



Thermodynamik – grundlegende Einsichten für ein Verständnis von Umweltproblemen

Malte Faber

Marco Rudolf

Marc Frick

Mi-Yong Becker

AWI DISCUSSION PAPER SERIES NO. 725

February 2023

Thermodynamik – grundlegende Einsichten für ein Verständnis von Umweltproblemen

Malte Faber^a, Marco Rudolf^b, Marc Frick^c und Mi-Yong Becker^d

^a Alfred-Weber-Institut für Wirtschaftswissenschaften, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. E-Mail: malte.faber@awi.uni-heidelberg.de

^b INEC – Institut für Industrial Ecology, Hochschule Pforzheim. E-Mail: marco.rudolf@hs-pforzheim.de

^c ZEW - Leibniz Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung Mannheim und Universität Basel. E-Mail: marc.frick@unibas.ch

^d Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ und Hochschule Bochum, Fachbereich Wirtschaft. E-Mail: mi-yong.becker@hs-bochum.de

Abstract

In this paper, we present a way that allows to make fundamental statements about how economic action entails harmful effects on the environment. These effects are due to natural scientific reasons and are particularly present in the industrialised economy. The starting point of our considerations is that every economic action requires energy, of which many different forms exist. Taking all of these forms into account, heat energy has a particular significance, because other forms of energy can never appear in isolation, but only conjointly with heat energy. For this reason, the branch of physics that deals primarily with energy is called thermodynamics. The study of thermodynamics yields the central link between economic activity and its environmental impact. Understanding basic insights of thermodynamics enables decision-makers in environmental policy to understand the nature of environmental problems and to develop possible solutions. First, we deal with the connection between physical work and heat. Then we explain the two main Laws of Thermodynamics and go into detail about the concept of entropy. We use Boltzmann's approach of the degree of order to give an illustration of the entropy concept. We then turn to the consideration of thermodynamics in economics, first provided by Georgescu-Roegen in 1971. Following this we explain the importance of thermodynamics for environmental policy. We conclude with a summary.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag stellen wir einen Weg vor, der es erlaubt, grundsätzliche Aussagen darüber zu treffen, dass wirtschaftliches Handeln schädliche Auswirkungen auf die Umwelt mit sich bringt. Diese Auswirkungen sind naturwissenschaftlich bedingt und treten insbesondere in der industrialisierten Wirtschaft auf. Ausgangspunkt unserer Überlegungen ist, dass jedes wirtschaftliche Handeln Energie benötigt, von der es viele verschiedene Formen gibt. Unter Berücksichtigung all dieser Formen kommt der Wärmeenergie eine besondere Bedeutung zu, da andere Energieformen nie isoliert, sondern nur in Verbindung mit der Wärmeenergie auftreten können. Aus diesem Grund wird der Zweig der Physik, der sich hauptsächlich mit Energie beschäftigt, Thermodynamik genannt. Das Studium der Thermodynamik stellt die zentrale Verbindung zwischen wirtschaftlicher Tätigkeit und ihren Auswirkungen auf die Umwelt her. Das Verständnis grundlegender Erkenntnisse der Thermodynamik ermöglicht es Entscheidungsträgern in der Umweltpolitik, das Entstehen von Umweltproblemen zu verstehen und mögliche Lösungen zu entwickeln. Zunächst befassen wir uns mit dem Zusammenhang zwischen physikalischer Arbeit und Wärme. Dann erläutern wir die beiden Hauptsätze der Thermodynamik und gehen ausführlich auf das Konzept der Entropie ein. Zur Veranschaulichung des Entropiekonzepts verwenden wir den Boltzmann'schen Ansatz des Ordnungsgrades. Anschließend wenden wir uns der Betrachtung der Thermodynamik in den

Wirtschaftswissenschaften zu, die erstmals von Georgescu-Roegen im Jahr 1971 vorgelegt wurde. Anschließend erläutern wir die Bedeutung der Thermodynamik für die Umweltpolitik. Wir schließen mit einer Zusammenfassung.

Key Words: Classical Mechanics, Thermodynamics, Energy, Entropy, Irreversibility, Joint Production, Efficiency, Environmental Problems,

JEL Classification: B2, Q32, Q51, Q57, Y80

1 Einführung¹

Die Überlegungen dieses Aufsatzes nehmen ihren Ausgangspunkt in dem Anliegen, einen naturwissenschaftlichen Umgang mit Umweltproblemen zu finden, die aus dem menschlichen Wirken, insbesondere aus dem Wirtschaften entstehen.

Dafür ist es wichtig, zunächst grundsätzlich die Frage zu klären, warum wirtschaftliche Aktivitäten überhaupt zu Umweltproblemen führen. Diese Frage erhält gegenwärtig nicht die Aufmerksamkeit, die sie verdient. Entweder wird der kausale Zusammenhang von wirtschaftlicher Tätigkeit und deren negativen Auswirkungen auf die uns umgebende Umwelt hingegenommen und nicht weiter hinterfragt, oder die Analyse konzentriert sich recht schnell darauf, die spezifischen Prozesse zu analysieren, die im Einzelfall – beispielsweise bei der Verschmutzung eines Flusses – am Werk sind.

Wir wollen im Folgenden einen anderen Weg aufzeigen, der es uns erlaubt, grundsätzliche Aussagen darüber zu treffen, in welcher Weise wirtschaftliches Handeln aufgrund naturwissenschaftlicher Zusammenhänge notwendigerweise Auswirkungen auf die Umwelt nach sich zieht, die häufig schädlicher Art sind. Dies gilt ganz besonders für menschliches Handeln in der industrialisierten Wirtschaft.² Wir wollen zeigen, wie sich auf einfache Weise erkennen lässt, wann wirtschaftliches Handeln umweltschädlich ist.

Um den notwendigen Zusammenhang zwischen menschlichem Handeln und seinen Auswirkungen auf die Umwelt systematisch verstehen zu können, wollen wir überlegen, ob es nicht möglich ist, einen Einfluss zu finden, der nicht nur bei allen wirtschaftlichen Handlungen, sondern sogar bei allen natürlichen Prozessen von Bedeutung ist. Könnte es vielleicht sein, dass ein solcher Einfluss existiert und zudem eine wesentliche Ursache für die Entstehung von Umweltproblemen ist?

Tatsächlich gibt es einen solchen Einfluss, nämlich die Energie. Es ist leicht einsehbar, dass es ohne Verwendung von Energie nicht möglich ist, irgendetwas zu bewirken, geschweige denn eine nützliche wirtschaftliche Handlung durchzuführen. Die grundlegende Betrachtung des Einflusses der Energie auf menschliche Tätigkeiten wird uns helfen, ökologische und ökonomische Grundlagen zu finden, die eine umfassende Sicht auf Umwelt und Wirtschaft ermöglichen. Diese

¹ Wir danken Jörg Hüfner, Reiner Manstetten und Klaus Jacobi für ihre Hilfe. Die Verantwortung für verbleibende Fehler und Schwächen liegt bei den Autoren.

² Auch in der Antike wurde schon vom Philosophen Plato über den Raubbau an Holz in den mediterranen Wäldern für den Bau von Flotten geklagt. Allerdings können wir aus den Schriften zur Ethik aus dem antiken Griechenland entnehmen, dass langfristige Einflüsse des Menschen auf die Natur weitestgehend unbekannt waren und deshalb ethisch kaum reflektiert wurden.

erlaubt es uns, unter Einbezug der folgenden Überlegungen, angemessene Lösungen für Umweltprobleme zu finden.

2 Unterschiedliche Energieformen und der Begriff der Thermodynamik

Im ersten Schritt der naturwissenschaftlichen Betrachtung der Energie stellen wir fest, dass es unterschiedliche Energieformen gibt. Besonders wichtig sind:

- Kinetische Energie (besitzt ein Körper aufgrund seiner Geschwindigkeit),
- potenzielle Energie³ (Energie der Lage; darauf beruhen Wasserkraftwerke, die mit dem Wasser von Staudämmen angetrieben werden),
- elektrische Energie,
- chemische Energie,
- Kernenergie,
- Strahlungsenergie (elektromagnetischer Wellen, Sonnenenergie) und
- Wärmeenergie.

Von all den genannten Energieformen hat die Wärmeenergie eine besondere Bedeutung, denn alle anderen Energieformen können nie isoliert erscheinen, sondern nur gemeinsam mit Wärmeenergie. Beispielsweise tritt chemische Energie als Feuer auf, Bewegungsenergie wiederum ist mit Reibung verbunden, die zu Wärme führt. Aus diesem Grund wird das Teilgebiet der Physik, das sich vornehmlich mit Energie beschäftigt, Thermodynamik genannt; das altgriechische Wort *thermós* bedeutet ‚warm‘ und das altgriechische Wort *dýnamis* bedeutet ‚Kraft‘. Im Deutschen wird die Thermodynamik auch als Wärmelehre bezeichnet. Allerdings geht es in der Thermodynamik nicht nur um Wärme, sondern auch um anderes, z. B. die Mischung von Stoffen.

Die Thermodynamik bildet das Verbindungsstück zwischen unserem Handeln und seinen Umweltauswirkungen. Sofern wir die Grundeinsichten der Thermodynamik verstanden haben, haben wir einen Zugang zu der Frage, wie Umweltprobleme entstehen. Gleichzeitig – und das ist für uns noch wichtiger – erhalten wir damit eine Orientierung, um die Entstehung von Umweltproblemen antizipieren zu können: nämlich überall dort, wo Energie verwendet wird. Nun ist die Thermodynamik kein einfaches Gebiet der Physik. Einer der einflussreichsten Thermodynamiker des 20. Jahrhunderts, Arnold Sommerfeld (1861–1951), beschrieb die Thermodynamik mit folgenden Worten: „Thermodynamik ist ein komisches Fach. Das erste Mal, wenn man sich damit befasst, versteht man nichts davon. Beim zweiten Durcharbeiten denkt man, man hätte nun alles verstanden, mit Ausnahme von ein oder zwei kleinen Details. Das dritte Mal, wenn man den Stoff durcharbeitet, bemerkt man, dass man fast gar nichts davon versteht, aber

³ In der Physik werden kinetische und potenzielle Energie unter dem Begriff der mechanischen Energie zusammengefasst.

man hat sich inzwischen so daran gewöhnt, dass es einen nicht mehr stört“ (zitiert aus Lauth und Kowalczyk 2015).

Wir entwickeln im Folgenden eine anschauliche Darstellungsweise und gehen dabei nur so weit in die Tiefe, wie es für den systematischen Blick auf Umweltprobleme erforderlich ist. Allerdings gibt es auch Grenzen für die Einfachheit einer guten Darstellung. Das hat Albert Einstein (1879–1955) treffend formuliert: „Man soll die Dinge so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher“. Der Grund für seine Einschränkung ist, dass es bei einer zu starken Vereinfachung zu einer falschen Darstellung kommt. Das ist gerade bei der Thermodynamik häufig geschehen. Daher werden wir uns im Folgenden an Einsteins Ratschlag halten und versuchen, die gute Mitte zwischen Einfachheit und Komplexität zu treffen.

Wir erläutern zunächst den Begriff der Wärmeenergie und klären den Zusammenhang von Wärme und mechanischer Arbeit. Damit erhalten wir die notwendigen Grundkenntnisse, um die sogenannten ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik zu verstehen.⁴ Danach wenden wir uns dem Unterschied zwischen freier – also nutzbarer – und nicht mehr nutzbarer Energie zu. Damit wollen wir einen Zugang zu dem in der Thermodynamik zentralen Begriff der Entropie schaffen, der vielen Menschen wenig vertraut ist.

2.1 Wärmeenergie

Wärme ist uns allen geläufig. Mal ist es zu warm, mal zu kalt, mal ist die Temperatur gerade recht. Diese alltägliche Beobachtung führt uns zu einer der zwei wesentlichen Eigenschaften der Wärmeenergie, nämlich der Temperatur. Weiterhin ist die Wärmeenergie bestimmt durch die oben erwähnte Entropie, auf die wir weiter unten ausführlich eingehen werden.

Aus diesen wesentlichen Eigenschaften der Wärme folgt jedoch noch nicht, was Wärme überhaupt ist. Es hat lange gedauert, bis herausgefunden wurde, dass Wärme Bewegungsenergie von Teilchen ist. Was bedeutet das und wie kam man darauf? Manche kennen noch die altmodischen Quecksilberthermometer. Je höher die Temperatur, desto mehr dehnte sich das Quecksilber in dem Glasröhrchen des Thermometers aus. Am Höhenstand des Quecksilbers konnte dann die Temperatur abgelesen werden. Diese Beobachtung gilt nicht nur für Quecksilber, sondern – wenn auch in unterschiedlichen Maßen – für viele Materien.⁵ Der Grund ist, dass jedes Molekül, ja jedes Atom, ständig in Bewegung ist. Wird Wärme zugeführt, dann nimmt die Wärmeenergie des Systems zu; denn die einzelnen Atome oder Moleküle, aus denen das System besteht, bewegen sich schneller, d. h. deren kinetische Energie nimmt zu. Je größer die Wärmeenergie der Teilchen,

⁴ Manche berühmte Physiker, wie Arthur S. Eddington (1882-1944), hielten den 2. Hauptsatz der Thermodynamik für das wichtigste Naturgesetz überhaupt.

⁵ Es gibt Ausnahmen. So schwimmt Eis auf Wasser, d. h. Eis ist ausgedehnter als Wasser.

desto schneller die Bewegung. Erst beim absoluten Nullpunkt, also bei minus 273 Grad Celsius kommt die Bewegung der Teilchen zum Stillstand.

2.2 Wärme und physikalische Arbeit

Welcher Zusammenhang besteht zwischen Wärme und physikalischer Arbeit⁶? Anschaulich kann dieser Zusammenhang am Beispiel von Dampflokomotiven, die man heute nur noch aus Filmen kennt, erläutert werden. Häufig wurde dort ein Heizer eingesetzt, der mit Kohle den Dampfkessel aufheizte. Der durch Kohlverbrennung – also mit Hitze – erzeugte Wasserdampf (im Dampfkessel) treibt durch den erzeugten Druck eine Kolbenmaschine an; diese bewirkt durch ihre Bewegungsenergie, dass der Zug in Bewegung kommt; physikalisch gesehen wird also Arbeit (Kraft mal Weg) geleistet.

An folgendem Beispiel wird deutlich, wie konzentriert die Energie in Form von Wärmeenergie ist: Betrachten wir einen Topf mit Wasser und erwärmen wir das Wasser um 1 Grad Celsius. Nun können wir uns fragen, wie viele Meter der Topf hochgehoben werden könnte, wenn die gleiche Menge an Energie, die zum Erhitzen notwendig war, in Form von Arbeit verwendet würde? Selbst manche Physikerinnen wären überrascht, dass die Antwort darauf heißt: 430 Meter! (Hüfner und Löhken: 266).

Gleiche Mengen an Energie sind, wirtschaftlich betrachtet, unterschiedlich viel wert: So ist der Preis von 1 kWh elektrischer Energie deutlich teurer als 1 kWh in Form von Wärme, die z. B. durch Erdgas hergestellt worden ist. Die Gesteungskosten von elektrischer Energie sind etwa 2- bis 3-mal so hoch wie die von Wärmeenergie bei gleichem Heizmaterial. Auf den ersten Blick ist das erstaunlich; denn beide Energiemengen bewirken beim Heizen das Gleiche. Warum unterscheiden sich diese beiden Formen dennoch wirtschaftlich so sehr? Ein erster Anhaltspunkt ist, dass elektrische Energie, wie alle anderen Energieformen, fast ohne Verluste in Wärme verwandelt werden kann. Im Gegensatz dazu kann Wärme nie vollständig in elektrische Energie, und auch nicht in alle anderen Energieformen, umgewandelt werden. Die Wärmeenergie unterscheidet sich also grundsätzlich von allen anderen Energieformen. Sie ist nur unter großen Energieverlusten zu transportieren oder in andere Energieformen umwandelbar. Sie ist somit für menschliche Zwecke nur bedingt nutzbar. Das bringt eine Reihe von Konsequenzen für Wirtschaft und Umwelt mit sich.

Der Grund für diese bedingte Nutzbarkeit der Wärmeenergie ergibt sich aus den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik.

⁶ Physikalische Arbeit = Kraft (F) mal Weg oder Strecke (s) = $F \cdot s$. Die Kraft F wirkt auf einen Körper, der in Richtung dieser Kraft die Strecke s zurücklegt.

3 Die zwei Hauptsätze der Thermodynamik: Energieerhaltung und Entropiesatz

3.1 Der 1. Hauptsatz

Um den 1. Hauptsatz zu verstehen, ist es notwendig, den Begriff des *Systems* zu erläutern. Thermodynamische Systeme sind räumlich abgegrenzt und unterscheiden sich durch drei Eigenschaften:

1. *Isolierte Systeme* tauschen weder Energie noch Materie mit ihrer Umgebung aus. – Beispiel: Eine abgeschlossene Kühlbox (in guter Näherung).
2. *Geschlossene Systeme* tauschen Energie, aber keine Materie, mit ihrer Umgebung aus. – Beispiel: Erde (abgesehen von Kometen und Raketen etc.). Wärmeaustausch mit dem Universum geschieht in Form von Strahlenenergie der Sonne.
3. *Offene Systeme tauschen* sowohl Energie als auch Materie mit ihrer Umgebung aus. – Beispiel: der Mensch. Wir nehmen Materie durch Essen und Trinken auf, geben Materie in Form von Exkrementen ab und tauschen Wärmeenergie mit der Umwelt aus.

Ob es überhaupt natürliche Systeme gibt, die diesen Unterscheidungen genau entsprechen, ist allerdings eine offene Frage. Reale Systeme auf der Erde tauschen – wenigstens in kleinen Mengen – immer Energie und Materie mit ihrer Umgebung aus.⁷

Das, was sich außerhalb eines Systems befindet, nennen wir seine „Umgebung“. Wann immer wir im Folgenden das Wort „System“ verwenden, meinen wir diese thermodynamische Definition: das Verhältnis eines abgegrenzten „Innen“ zu einem umgebenden „Außen“. Dabei sind die Grenzen eines Systems immer davon bestimmt, worauf sich das Interesse richtet, und umfasst also die Interaktionen der mit dem System umfassten Systemelemente (Innen). Eine Dampflok können wir als System verstehen, wenn wir uns für die Prozesse und Interaktionen einer Dampflok mit ihrer Umgebung, dem Außen, (z. B. Emissionen in die Atmosphäre) interessieren. Bezieht sich unser Interesse aber auf die Prozesse und Interaktion der Elemente im Dampfkessel (z. B. das Verhalten der Wassermoleküle bei Wärmezufuhr), dann ist die Systemgrenze so zu wählen, dass der Dampfkessel als System definiert ist, wodurch die übrige Dampflok und die weitere Umgebung als „Außen“ definiert werden.

Nun können wir den 1. Hauptsatz der Thermodynamik formulieren. Er lautet:

In einem isolierten System sind die gesamte Energie und die gesamte Masse stets konstant.

⁷ Ist der betrachtete Zeitraum jedoch nicht groß, dann können wir diesen Austausch aufgrund der geringen Menge vernachlässigen.

Diese Aussage mag auf den ersten Blick überraschen. Wie kann es sein, dass die Energie, die in einer Kerze enthalten ist, nachdem sie ganz aufgebrannt und erloschen ist, dennoch erhalten geblieben ist? Nehmen wir an, sie habe sich in einem *isolierten System*, sozusagen in einem abgeschlossenen Raum befunden. Dann ist die chemische Energie der Kerze beim Verbrennen in Wärme übergegangen, entsprechend hat sich die Wärme in dem Raum um die gleiche Menge erhöht. Folglich ist die Gesamtenergie, die gleich der Summe aus chemischer Energie und Wärmeenergie ist, entsprechend dem 1. Hauptsatz die gleiche geblieben. Dennoch ist, physikalisch gesehen, viel in unserem System geschehen. Was in unserem System passiert ist, darüber gibt der 2. Hauptsatz Auskunft.

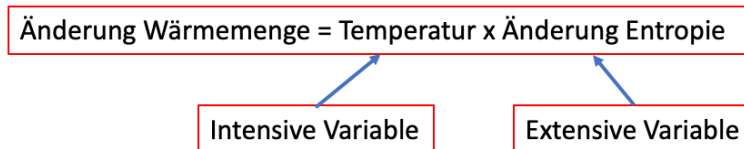
3.2 Der 2. Hauptsatz und der Begriff der Entropie

Der 2. Hauptsatz sagt etwas darüber aus, wie sich die Energie bei einer Energieumwandlung *qualitativ* verändert. Er drückt aus, in welche Richtung Energieumwandlung möglich ist. So ist es beispielsweise möglich, mechanische, elektrische oder chemische Energie vollständig in *Wärmeenergie* umzuwandeln. Wärmeenergie dagegen lässt sich, wie oben erwähnt, nur teilweise in die vorgenannten Energien umwandeln.

Wie kann man also die Möglichkeiten für die qualitative Veränderung der Wärmeenergie ermitteln? Jede Veränderung einer Energieform bestimmt sich aus dem Produkt einer intensiven Variablen mit einer extensiven Variablen. Wie unterscheiden sich diese beiden Begriffe? Bei einer Extension handelt es sich um eine Ausdehnung. Intensiv wird dagegen mit „durchdringend“ in Bezug auf die Sinneseindrücke bezeichnet. An Beispielen wollen wir das erläutern. Betrachten wir zwei Körper, der eine mit einem Gewicht von 60 kg, der andere von 40 kg. Die Gewichte sind dann die extensiven Variablen. Nehmen wir an, beide bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 200 Stundenkilometer. Die Geschwindigkeit ist dann die intensive Variable. Nehmen wir weiter an, beide Körper vereinigen sich in der Bewegung. Dann ist die extensive Variable des vereinigten Körpers die Summe der beiden extensiven Variablen, also 100 kg, die intensive Variable bleibt jedoch mit 200 Stundenkilometer konstant. Ähnliches gilt, wenn wir die beiden Körper betrachten und dieses Mal auf eine Temperatur von 30 Grad Celsius erhitzen. Die intensive Variable jedes der beiden Körper ist deren Temperatur. Vereinigen wir sie wieder, dann erhöht sich wiederum die extensive Variable, das Gewicht, auf 100 kg, die intensive Variable bleibt dagegen mit 30 Grad konstant.

Betrachten wir nun verschiedene Energieformen, so ergibt sich z. B. die physikalische Arbeit aus der Multiplikation der intensiven Variablen Kraft mit der extensiven Variable Weg. Bei der elektrischen Energie hingegen ist die intensive Variable die Spannung und die extensive Variable die Stromstärke. Beim Gasdruck ist die intensive Variable der Druck und die extensive Variable das Volumen. Wenden wir uns nun der Wärmeenergie zu. Offensichtlich ist die Temperatur die

intensive Variable. Was aber könnte die extensive Variable sein? Während bei allen anderen Energieformen die extensive Variable in der Realität leicht zu beobachten ist, konnte jedoch für die extensive Variable der Wärmeenergie keine beobachtbare Größe gefunden werden, obwohl sich zahlreiche Naturwissenschaftler lange Zeit mit diesem Thema beschäftigten. Schließlich hatte der Physiker Rudolph Clausius (1822–1888) den genialen Einfall, eine nicht beobachtbare extensive Variable einzuführen, um die Veränderung der Wärmeenergie beschreiben zu können; er nannte sie Entropie. Dieses Wort stammt ab von dem altgriechischen Begriff der *entropía*, zu Deutsch ‘Wendung’. Eine Änderung der Wärmeenergie ergibt sich somit als Produkt der intensiven Variablen, der Temperatur, mit der extensiven Variablen, der Änderung der Entropie.



Aus der Formel ergibt sich zudem, dass bei einem Prozess die Änderung der Entropie von der Temperatur beeinflusst wird; denn

$$\text{Änderung der Entropie} = \text{Änderung der Wärmemenge} / \text{Temperatur}$$

Jede Änderung der Wärmemenge bewirkt bei gleichbleibender Temperatur also eine Änderung der Entropie. Jedoch ist die Höhe der Änderung der Entropie kleiner, je höher die Temperatur und größer, je geringer die Temperatur des gesamten Prozesses ist. Dies führt dazu, dass gewisse Prozesse, wie z. B. Kraftwerke oder Verbrennungsmotoren, meist effizienter ablaufen, wenn sie bei hohen Temperaturen durchgeführt werden. Dies hat Einfluss auf den Wirkungsgrad, worauf wir in Abschnitt 4.2 eingehen werden.

An dieser Stelle wird bereits deutlich, dass Entropie keine leicht verständliche Größe ist. Aufgrund der der axiomatischen und damit formalen Definition der Entropie können wir uns intuitiv darunter nichts vorstellen. Sie ist eine rein formale Quantität, der aber keine anschauliche Größe entspricht. Der Physiker Max Planck (1857-1947) sagte einmal: „Entropie ist etwas, was man nicht versteht, aber man gewöhnt sich daran“.⁸

Nachdem wir uns jetzt ein wenig an Entropie gewöhnt haben, können wir den 2. Hauptsatz der Thermodynamik angeben. Er lautet in der Formulierung von Rudolf Clausius (1822–1888) aus dem Jahr 1865:

In einem isolierten System kann die Entropie nicht abnehmen.

⁸ Zitiert aus Hüfner und Löhken 2010: 272.

Es handelt sich demnach bei der Veränderung der Quantität von Entropie immer nur um eine Änderung in eine Richtung. Entropie kann von selbst nur entstehen, nicht aber vernichtet werden. Folglich kann in einem *isolierten System* die Entropie nur gleichbleiben oder zunehmen; sie kann also nie abnehmen.

Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ergeben sich weitreichende Konsequenzen. Aus dem Schulunterricht erinnern sich vielleicht manche Leser oder Leserinnen noch an folgende Schlussfolgerung aus dem 2. Hauptsatz: Ein Perpetuum Mobile ist nicht möglich, denn durch die Bewegung wird Energie aufgebraucht. So wird zum Beispiel selbst ein Pendel irgendwann zum Stehen kommen, da unvermeidlicherweise Bewegungsenergie durch Reibung mit der Luft in Wärmeenergie umgewandelt wird.⁹ Hat die Entropie in einem *isolierten System* ihr Maximum erreicht, dann ist das System in einem stabilen Gleichgewichtszustand: Alle Veränderungsprozesse, z. B. Temperaturänderungen, sind beendet. Dabei ist zu bedenken, dass wir nur von *isolierten Systemen* sprechen, für die gilt, dass alle Beeinflussungen von außen ausgeschlossen sind.

Diese Einsicht zeigt: Bestimmte Prozesse sind irreversibel. Das bedeutet, Prozesse sind nicht umkehrbar, wie z. B. das Verbrennen einer Kerze. Selbst wenn die Kerze in einem *isoliertem System* verbrennen würde und damit die gesamte Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird und ohne Verluste erhalten bleibt, ist es nicht möglich, die Kerze wieder herzustellen. Das liegt daran, dass beim Verbrennungsprozess Entropie entsteht. Ein weiteres Beispiel für die Irreversibilität ist eine Eisenstange, die an einem Ende heiß und am anderen kalt ist. Nach einiger Zeit wird die Eisenstange an allen Stellen die gleiche Temperatur aufweisen. Es wird jedoch nie geschehen, dass ein Ende von selbst wieder heiß und das andere wieder kalt wird.

3.3 Freie Energie und Entropie

Eine der wichtigen Fragen, die sich mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes klären lässt, lautet: Wie viel von einer Energieart lässt sich in physikalische Arbeit umwandeln? Diese Frage hat große Bedeutung für die Wirtschaft, denn sie stellt sich im ganzen Feld der Produktion. Zur Beantwortung wurde in der Physik der Begriff „freie Energie“ eingeführt. Die Definitionsgleichung für die freie Energie F lautet

$$F = U - T \times S,$$

worin U die Gesamtenergie des Systems, S seine Entropie und T die (absolute¹⁰) Temperatur ist, $T \times S$ ist das Produkt aus Temperatur und Entropie. Die freie Energie ist der Anteil der

⁹ Für einen ausführlichen Beweis siehe Faber et al. 1983: 81-83.

¹⁰ Auf der Temperaturskala von Kelvin, beginnend beim absoluten Nullpunkt von -273° Celsius.

Gesamtenergie, die in Arbeit verwandelt werden kann. Die freie Energie ist es, worauf es in der Wirtschaft entscheidend ankommt. Das Produkt aus Temperatur und Entropie ($T \times S$) ist der Anteil der Gesamtenergie, der nicht in Arbeit umgewandelt werden kann. Der zweite Hauptsatz sagt uns, dass die freie Energie in einem *isolierten System* nicht zunehmen, sondern durch Energieumwandlungen nur abnehmen kann.

3.4 Ordnungsgrad als Veranschaulichung der Entropie

Wie oben schon einmal erwähnt, ist es nicht möglich, sich unter Entropie etwas Konkretes anschaulich vorzustellen. Es ist allerdings möglich, sich eine zur Entropie in direkter Korrelation stehende Größe vorzustellen; das hat der Physiker von Boltzmann (1844-1906) gezeigt: Je höher die Entropie eines Systems ist, desto größer ist die Unordnung in dem System. Ein Beispiel¹¹ dafür ist ein Stück Zucker, das in einer Tasse Kaffee sich ohne unser Zutun auflöst. Das Umgekehrte geschieht dagegen nicht. Die Ordnung des Systems hat sich verringert und die Unordnung hat folglich zugenommen. Die Entropie des Systems, der Grad der Unordnung, hat sich erhöht. Wir halten fest: Erhöht sich die Entropie, dann verringert sich der Ordnungsgrad, was bedeutet: Die (molekulare) Unordnung nimmt zu. Dieser Umstand führt dazu, dass in vielen Fällen die Erhöhung der Entropie für Menschen etwas Negatives ist, da Systeme mit niedrigerer Ordnung weniger freie Energie – also Energie, die nutzbar ist – enthalten.

Thermodynamische Zusammenhänge haben viele wirtschaftliche Konsequenzen. Diese Einsicht wurde insbesondere im Rahmen der Ökologischen Ökonomik unter dem Begriff der *Kuppelproduktion* formuliert (Baumgärtner et al. 2006). Kuppelprodukte sind thermodynamisch notwendigerweise auftretende Nebenprodukte von Produktionsprozessen, die in der Regel unerwünscht sind und in vielen Fällen zu Umweltschäden führen. Prominente Beispiele für Umweltschäden, die durch Kuppelprodukte hervorgerufen wurden, sind insbesondere der Klimawandel, der Verlust an Biodiversität und das globale Wasserproblem.

4 Die Berücksichtigung der Thermodynamik in den Wirtschaftswissenschaften

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erlebte die Physik mit der Entwicklung der Thermodynamik eine Revolution. Erscheinungen, die mit Energie zusammenhängen, wurden theoretisch und praktisch erforscht. Die Motivation hinter dieser Forschung war wirtschaftlich bedingt, denn man wollte den Wirkungsgrad der Wattschen Dampfmaschine verbessern.

¹¹Hüfner und Löhken 2010:288; auf Seiten 286 bis 288 werden die theoretischen Zusammenhänge erläutert. Siehe auch Faber et al. 1985: 88-89.

In die Untersuchungen der Wirtschaftswissenschaften fanden thermodynamische Überlegungen allerdings erst im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts Eingang. Als erster Wirtschaftswissenschaftler legte der Rumäne Nicholas Georgescu-Roegen (1906–1994) in seinem bahnbrechenden Werk *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) den Schwerpunkt seiner Untersuchung der Wirtschaft auf energetische Überlegungen. Er konnte damit zeigen, wie eng Wirtschaft und Umwelt aufgrund thermodynamischer Zusammenhänge verflochten sind.

Es ist eigentlich merkwürdig, dass einer der wichtigsten, vielleicht sogar der wichtigste Produktionsfaktor der Wirtschaft, nämlich die Energie, in den herkömmlichen Wirtschaftswissenschaften, deren Grundlagen im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts gelegt wurden, keine herausragende Bedeutung hatte. Obwohl also Energie einer der wichtigsten wirtschaftlichen Produktionsfaktoren ist, spielt die Thermodynamik auch gegenwärtig in weiten Teilen der Wirtschaftswissenschaften keine herausgehobene Rolle. Energie ist jedoch für jeden Produktionsprozess notwendig und ihre Nutzung hat Auswirkungen auf die Natur. Sie führt zu einer irreversiblen Umwandlung der fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Gas in Wärme, CO₂ und andere Treibhausgase sowie Schadstoffe (z. B. Feinstaub) und damit zum Klimaproblem und vielfältigen weiteren Umweltproblemen. Insbesondere zeigte Georgescu-Roegen die negative Seite der industriellen Produktion. Zum einen kann ein energetischer Rohstoff, wie Kohle, Öl oder Gas nach seiner Verwendung nicht ein weiteres Mal energetisch genutzt werden. Dieser Vorgang ist folglich irreversibel. Vielleicht noch wichtiger ist aber, dass industriell immer mehr hergestellt wird, als eigentlich beabsichtigt und benötigt wird – Kuppelproduktion und oftmals umweltschädliche Kuppelprodukte sind unausweichlich (Baumgärtner et al. 2006: Kapitel 3).

Diese Tatsache ist leicht zu vermitteln und schärft das Bewusstsein für die Risiken unserer Produktionsweise. Ein Beispiel ist die Herstellung von Stahl mit Hilfe von Koks und Eisenerz. Dabei entsteht nicht nur Stahl, sondern auch die Rückstände des Herstellungsprozesses, wie CO₂, Abwasser, Staub usw.¹² Diese auf der Grundlage von thermodynamischen Zusammenhängen gewonnenen Erkenntnisse sind für das Verständnis von Umweltproblemen zentral.

4.1 Der Übergang von der Klassischen Mechanik zur Thermodynamik im Zuge der Industrialisierung

Die Klassische Mechanik befasst sich mit Systemen, die nur wenige Elemente umfassen, z. B. den Körper eines Planetensystems. Sie sind übersichtlich und können daher leicht beschrieben werden. Eine wesentliche Eigenschaft ist, dass die Vorgänge der Systeme der Klassischen

¹² Weitere Beispiele zu Papier, Chlor, Zement und Schwefelsäure werden ausführlich von Baumgärtner et al. 2006: 273-338 behandelt.

Mechanik in der Zeit umkehrbar sind; so könnte ein Planetensystem sich auch in umgekehrter Richtung bewegen. Das bedeutet, dass Prozesse in klassisch-mechanischen Systemen in der Zeit umkehrbar sind, also reversibel. Auch erkennen wir, dass dabei Temperatur, Wärme und daher auch Entropie keine Rolle spielen.

Ganz anders verhält es sich mit komplexen Systemen, z. B. einem See, der aus vielen Wassertropfen und noch viel mehr Wassermolekülen besteht. Die Komplexität ergibt sich allerdings nicht nur aus der großen Zahl der Elemente in einem solchen System, sondern auch dadurch, dass diese Elemente, hier die Wassertropfen, miteinander interagieren. Wird beispielsweise ein See an einer Seite durch Sonnenstrahlen erwärmt, dann breitet sich diese Wärme im ganzen See aus. Wie ist es möglich, mit solchen komplexen Sachverhalten umzugehen? Hinzu kommt, dass im Gegensatz zu klassisch-mechanischen Systemen die Vorgänge in komplexen Systemen irreversibel, also nicht umkehrbar sind: eine Folge des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik.

Anfang des 19. Jahrhunderts begannen Praktikerinnen, Ingenieure und Wissenschaftlerinnen wie James Watt (1736-1819), Sadi Carnot (1796-1832), James Prescott Joule (1818-1889), Rudolph Clausius (1822-1888) und William Thompson (der spätere Lord Kelvin, 1824-1907) in ihrem Bestreben, die Leistungsfähigkeit von Dampfmaschinen zu verbessern, damit, solche komplexe Systeme zu untersuchen. Die vereinfachte Sichtweise der klassischen Mechanik reichte für ihre Forschung nicht aus, daher war ihr Bestreben von Anfang an, das Zusammenspiel natürlicher Systeme mit technischen Systemen – die ja durch zielgerichtetes menschliches Handeln geschaffen und verwaltet werden – in ihrer Komplexität zu begreifen. Das war damals ein in einer traditionellen Wissenschaft wie der Physik ein ganz und gar ungewöhnliches Vorgehen (Baumgärtner 2004: 103).

4.2 Die Grenzen des thermodynamischen Wirkungsgrads

Wie können Ingenieure, Technikerinnen, oder Unternehmer, damals und auch heute, ihr thermodynamisches Wissen praktisch nutzen? Eine wesentliche Anwendung ist die Berechnung des thermodynamischen Wirkungsgrades einer Maschine. Bei jeder Verwendung von Energie entsteht aufgrund des 2. Hauptsatzes Wärmeenergie, die nicht in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel von der in ein System eingesetzten Energie in die gewünschte Wirkung umgewandelt wird. Betrachten wir zwei Autos: Das eine Auto wird mit einem Verbrennungsmotor das andere mit einem Elektromotor betrieben. Der Verbrennungsmotor setzt bei durchschnittlicher Fahrweise in Deutschland ca. 20 Prozent der im Benzin enthaltenen Energie in Bewegung des Autos um (20 Prozent Wirkungsgrad). Bei dem elektrisch betriebenen Fahrzeug liegt der Wirkungsgrad hingegen bei rund 80 Prozent. Werden Verluste miteinbezogen, die durch das Laden der Batterie und der Strombereitstellung anfallen,

liegt der Wirkungsgrad mit 64 Prozent noch immer deutlich über dem des Verbrennungsmotors.¹³

Auch bei Kraftwerken spielt der Wirkungsgrad eine entscheidende Rolle. Kohlekraftwerke haben aktuell einen Wirkungsgrad bis maximal 45 Prozent, den allerdings nur die modernsten und größten Steinkohlekraftwerke erreichen; der deutsche Kraftwerksbestand erreicht Wirkungsgrade von knapp unter 40 Prozent.¹⁴ Wie unterschiedlich die Wirkungsgrade von Kraftwerken sind, erkennt man z. B. daran, dass das Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk Haveli, das 2018 in Pakistan hergestellt worden ist, mit 62,4 Prozent den damals weltweit höchsten Wirkungsgrad aller mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerke hatte.¹⁵

Dass der thermodynamische Wirkungsgrad durch technischen Fortschritt stark verbessert werden kann, zeigt schon dessen erste Anwendung am Beispiel der Dampfmaschine.¹⁶ Bei den ersten von James Watt entwickelten Dampfmaschinen lag dieser bei nur 1 Prozent; 99 Prozent der eingesetzten Energie blieben folglich ungenutzt. Es dauerte lange bis der Wirkungsgrad auf die heute üblichen 30 bis 50 Prozent erhöht werden konnte. Allerdings gibt es kein Entkommen vor dem 2. Hauptsatz. Da aufgrund technischer Umstände Entropie und damit auch Wärmeenergie entsteht, die nicht mehr verwendet werden kann und zudem Prozesse nur innerhalb bestimmter Temperaturniveaus durchgeführt werden können, ist der theoretisch maximale Wirkungsgrad – der sogenannte Carnot-Wirkungsgrad – nicht nur kleiner als eins, sondern häufig beträchtlich kleiner als eins¹⁷.

4.3 Der Bedeutungsgewinn der Thermodynamik für die Betrachtung der Umwelt in den Wirtschaftswissenschaften

Wir beschäftigen uns so ausführlich mit Thermodynamik, da sie die Grundlage aller Vorgänge in der Natur und damit auch der Wirtschaft ist. Georgescu-Roegen (1971) erkannte, dass sowohl biologische als auch wirtschaftliche Systeme *offene Systeme* sind, also Materie und Energie verwenden, diese von ihrer Umgebung aufnehmen und nach Gebrauch wieder an sie abgeben. So entnimmt die Wirtschaft Rohstoffe, seien sie pflanzlich, tierisch oder rohstoffartig; nach deren Gebrauch werden sie wieder in Form von Abluft, Abwasser und Abfall etc. in die Umwelt abgegeben, im industriellen Zeitalter, also seit Mitte des 18. Jahrhunderts, geschieht das überwiegend in schädlicher Weise. Georgescu-Roegen entwickelte damit die Grundlagen für eine bioökonomische Theorie, indem er die Thermodynamik umfassend auf Zusammenhänge

¹³ BMVU 2021.

¹⁴ Energie-Lexikon 2022.

¹⁵ Tractebel Engie 2018.

¹⁶ Hüfner und Löhken 2010: 270.

¹⁷ Für detailliertere Ausführungen siehe z. B. Energie-Lexikon 2021.

zwischen Umwelt und Wirtschaft anwendete. Wie der Titel seines Buches *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) zeigt, spielt dabei der Begriff der Entropie die entscheidende Rolle. Er führte damit einen Begriff in die Wirtschaftswissenschaften ein, der – wenn berücksichtigt – zu einer neuen Sicht auf wirtschaftliche Vorgänge führt. Aus seinen Überlegungen folgt, dass die steigende Ressourcennutzung zu einer Erschöpfung der Erdkapazitäten führt, sowohl bezüglich der Rohstoffe als auch bezüglich der Kapazitäten der Umwelt, Schadstoffe aufzunehmen und diese zu beseitigen: „Das Entropiegesetz [d. h. der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik; d. Verf.] selbst erweist sich als das ökonomischste aller Naturgesetze“¹⁸ [Unsere Übersetzung, die Verf.]. Diese Einsicht veranlasste ihn, einen radikalen Neubeginn der begrifflichen Grundlagen der Wirtschaftswissenschaften zu fordern. Das führte wesentlich dazu bei, dass 1989 die International Society for Ecological Economics gegründet wurde und damit ein neuer Bereich der Wirtschaftswissenschaften, die Ökologischen Ökonomik.

5 Zusammenfassung: Thermodynamische Grundlagen für Umweltpolitik

Wie lassen sich zentrale Erkenntnisse für die Grundlagen Umweltpolitik zusammenfassen? Georgescu-Roegen (1971) zeigte allgemein, welche Folgen es für die Umwelt hat, dass seit der Industriellen Revolution im 18. Jahrhundert zunehmende Mengen hochkonzentrierter – und damit leicht verfügbarer – Ressourcen (mit niedriger Entropie) in der Wirtschaft verwendet werden. So dient beispielsweise Erdöl, das in der Erde in hoher Konzentration (niedrige Entropie) vorhanden ist, als Energiequelle, um mit anderen Materialien, die mit niedriger Konzentration (hoher Entropie) gefördert worden waren, hochwertige Materialien, z. B. Aluminium (niedrige Entropie), herzustellen. Bei der Produktion entstehen Abwässer, Abwärme, CO₂, Schlacke, Feinstaub usw. (mit hoher Entropie). Auch die erzeugten Güter (niedrige Entropie) werden nach ihrem Gebrauch im Laufe der Zeit zu Abfällen (hohe Entropie), die wiederum in die Umwelt abgegeben werden.

Den Umstand, dass in der Neuzeit Energie und Materie in Wirtschaftsprozessen aus einem Zustand leichter Verfügbarkeit letztlich in Abfälle umgewandelt werden, beschrieb Georgescu-Roegen zugespitzt wie folgt: "Der Wirtschaftsprozess ist entropisch, er schafft oder verbraucht weder Materie noch Energie, sondern verwandelt nur niedrige in hohe Entropie".¹⁹ [Unsere Übersetzung, die Verf.] Er kritisierte, dass die Ökonomen das Entropiegesetz nicht berücksichtigen, obwohl es den wichtigsten Produktionsfaktor, nämlich die freie Energie, also die nutzbare Energie betrifft. Er hält daher, wie oben erwähnt, das Entropiegesetz für „das ökonomischste aller physikalischen Gesetze“.²⁰ Wie hoch er die Bedeutung der Entropie für die

¹⁸ Georgescu-Roegen 1971: 280.

¹⁹ Ibid.: 281.

²⁰ Ibid.: 280.

Wirtschaft einschätzt, zeigt auch seine Aussage: „Geringe Entropie ist eine notwendige Bedingung für Nützlichkeit“²¹[Unsere Übersetzung, die Verf.].

Thermodynamisch betrachtet, können wir diese Vorgänge wie folgt beschreiben: Die menschliche Wirtschaft ist ein offenes Teilsystem, das in das größere System der natürlichen Umwelt, der Erde, eingebettet ist. Die Erde ist als geschlossenes System zu betrachten, da sie zwar (fast) keine Materie mit ihrer Umgebung austauscht, wohl aber Energie, die in Form von Sonneneinstrahlung eintritt. Unsere Wirtschaft entnimmt noch heute größtenteils Materialien mit niedriger Entropie (Öl, Kohle, Erdgas, Uran etc.) aus der Umwelt und setzt sie zur Produktion großer Mengen an Investitions- und Konsumgütern ein. Die Produktionsmittel und letztlich auch die Konsumgüter werden zumeist nach ihrem Gebrauch in Form von hoher Entropie, also niedrigem Ordnungszustand, an die Umwelt abgegeben. Da die Mengen an Produktionsmitteln im Laufe der Industrialisierung zugenommen haben, sind die Verarbeitungskapazitäten der Umwelt nicht mehr groß genug, schädliche Kuppelprodukte zu verarbeiten und wieder in die natürlichen Prozesse einzugliedern. Stattdessen zerstören Kuppelprodukte die Umwelt, wie z. B. das Artensterben zeigt. Die Aufgabe von Umweltpolitik ist es daher, diese Entwicklung aufzuhalten und umzukehren. Das kann grundsätzlich auf zwei Wegen geschehen, die miteinander kombinierbar sind:

1. Wir können weniger produzieren und konsumieren, wodurch der Durchfluss an Energie und Materialien durch unsere Wirtschaft verringert wird und damit gleichzeitig auch die Menge an Schadstoffen, die aus der Wirtschaft an die Umwelt abgegeben werden.
2. Wir können unsere Wirtschaft insbesondere durch einen Technologiewandel bis zu einem gewissen Grad so umstellen, dass durch die Nutzung erneuerbarer Energien und die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft weniger Schadstoffe entstehen. Die Nutzung erneuerbarer Energien kann bewirken, dass durch unser Wirtschaften deutlich weniger Entropie entsteht; sie ist die Basis für die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft. Verbleibende Mengen an Schadstoffen müssen so gering sein, dass sie umweltfreundlich entsorgt werden können.

Diese Wege haben unterschiedliche Chancen auf Umsetzbarkeit. So steht ersterem entgegen, dass viele Menschen noch heute auf einem Konsumniveau leben, welches ihre grundlegenden Bedürfnisse nicht erfüllt und folglich angehoben werden muss. Zudem sträuben sich zweitens viele Menschen mit bereits sehr hohem materiellem Wohlstandsniveau gegen dessen Senkung. Hinzukommt drittens, dass wir noch mit einem großen Zuwachs an Menschen rechnen müssen.

²¹ Georgescu-Roegen 1979: 1042.

Der zweite Weg wird derzeit in gewissen Grade in Teilen der Welt angegangen, die Entwicklungen sind allerdings noch weit von einem akzeptablen Ergebnis entfernt, wie das zunehmende Artensterben und immer noch hohe Mengen an Treibhausgasemissionen pro Kopf zeigen. Insbesondere zeigt uns die thermodynamische Perspektive die noch unbewältigten Herausforderungen in der Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft auf. Denn jenseits des Aufbaus eines Versorgungssystems mit erneuerbarer Energien (das seinerseits mit Entropie einhergeht), ist eine Durchdringung von Recyclingprozessen für insbesondere komplex verbundene Materialien, wie Metalle, seltene Erden etc. (deren Abbau sowie Recycling mit Entropie einhergeht) derzeit nicht absehbar. Das zeigt, dass eine thermodynamische Perspektive uns die Wichtigkeit des ersten Wegs, des weniger Produzierens und Konsumierens, verdeutlicht.

Da die Thermodynamik entscheidend ist für alle Wechselwirkungen zwischen Wirtschaft und Umwelt, sollte das Verständnis derselben Grundlage ökologisch-ökonomischer Umweltmaßnahmen sein. Dazu ist es erforderlich, dass zentrale thermodynamische Erkenntnisse in Lehre und Forschung sowie Umwelt- und Wirtschaftspolitik integriert werden.

6 Literaturverzeichnis

Baumgärtner, S. (2004) Thermodynamic Models, in Proops, J. und Safonov, P. (Editors), Modelling in Ecological Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA: 102-122.

Baumgärtner, S., Faber, M., Schiller, J. (2006) Joint Production and Responsibility in Ecological Economics. On the foundations of Environmental Policy. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.

BMVU, (2021) Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos? Abgerufen am 24.01.2023 von:
<https://www.bmvv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten#:~:text=Wenn%20man%20die%20Verluste%20einbezieht,Fahrzeug%20mit%20einem%20konventionellen%20Verbrennungsmotor>

Energie-Lexikon, (2022) Kohlekraftwerk. Abgerufen am 24.01.2023 von:
<https://www.energie-lexikon.info/kohlekraftwerk.html>

Faber, M., Niemes, H., Stephan, G. (1983) Entropie, Umweltschutz und Rohstoffverbrauch. Eine naturwissenschaftlich ökonomische Untersuchung. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 214. Englische Übersetzung: Entropy, Environment and Resources. An Essay in Physio-Economics (1995). Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo.

Georgescu-Roegen, N. (1971) The Entropy Law and the Economic Process, Harvard University Press, Cambridge, Mass. London, England.

Georgescu-Roegen, N. (1979) Energy analysis and economic valuation. Southern Economic Journal, 45: 1023-1058.

Hüfner, J. und Löhken, R., (2010) Physik ohne Ende... Eine geführte Tour von Kopernikus bis Hawking, WILEY-Verlag, Weinheim.

Lauth, J. G., und Kowalczyk, J. (2015). Thermodynamik. Springer, Berlin, Heidelberg.

Tractebel Engie (2018) Rekordwirkungsgrad – 62,4% für ein Gas- und Dampf-Kombikraftwerk.
Abgerufen am 24.01.2023 von:

<https://tractebel-engie.de/de/nachrichten/2018/rekordwirkungsgrad-fuer-ein-gud-kraftwerk>