

Krcal, Hans-Christian

Working Paper

Entropie im System - die strukturelle Beschaffenheit der betrieblichen Kraftbasis

Discussion Paper Series, No. 691

Provided in Cooperation with:

Alfred Weber Institute, Department of Economics, University of Heidelberg

Suggested Citation: Krcal, Hans-Christian (2020) : Entropie im System - die strukturelle Beschaffenheit der betrieblichen Kraftbasis, Discussion Paper Series, No. 691, University of Heidelberg, Department of Economics, Heidelberg, <https://doi.org/10.11588/heidok.00028941>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/235014>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

University of Heidelberg

Department of Economics



Discussion Paper Series | No. 691

Entropie im System - die strukturelle Beschaffenheit
der betrieblichen Kraftbasis

Hans-Christian Krcal

Oktober 2020

Entropie im System – die strukturelle Beschaffenheit der betrieblichen Kraftbasis

*Hans - Christian Krcal **

Department of Economics / Alfred-Weber-Institute for Economics

Business Administration

University of Heidelberg

Abstract:

Within firms diverse fields of action are regarding the transformation of material and immaterial resources. The dimension of choices is being determined by the basic laws of thermodynamics. The entropic relevance of action within a firm has been considered by the paper. From a social system theory perspective the impact of energy flow and its qualities on the decisional opportunity level is being discussed. It can be shown that from the perspective of thermodynamics the threat by equilibrium has some essential consequences for the firm's decision making in general.

JEL- classification codes: B49, D24, D29, B41, M10, M20, P18, Q43

Key words: closed and open system, thermodynamics, decision making, entropy, steady state and thermodynamic equilibrium

*Bergheimer Strasse 58, 69115 Heidelberg, Germany, e-mail: hans-christian.krcal@awi.uni-heidelberg.de und hans-christian.krcal@dhw-mannheim.de

1. Einleitung

Das wirtschaftliche Wirken bezieht sich bekanntermaßen auf den Umgang mit knappen Ressourcen zur Bedarfsdeckung. Die dafür notwendige Ressourcentransformation kennt in der Leistungserstellung materieller Güter unterschiedliche Handlungssysteme, wobei „Energie“ eine zentrale Bedeutung zukommt. Die „wirkende Kraft“ (griechisch: *energeia*) stellt nicht nur eine Größe zur Beschreibung der Entwicklung/Veränderung physikalischer Systeme da, sondern ist eine der Grundlagen für das Leben selbst. „Energien“ kommen in unterschiedlichen Formen zum Ausdruck. Das „innere Wirken“ (Energie) mit seinen diversen Arten ist zum einen bekannt als potentielle Energie (Lage), kinetische Energie (Bewegung), chemische Energie (Speicherung in Verbindungen) und als thermische Energie (Wärme durch Bewegung der Atome). Die Behandlung der thermischen Energie Wärme ist die Ausgangsbasis für die folgenden Darlegungen zum Zusammenhang der Konstrukte „Energie“ und „Entropie“, wobei letzteres etwas über die Qualität der Verfügbarkeit von Energie aus struktureller Systemperspektive aussagt.

Zum anderen haftet Energie auch noch immer etwas Unerklärliches an; um mit den Worten des Physiknobelpreisträgers R. Feynman zu sprechen: ‚It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is. We do not have a picture that energy comes in little blobs of a definite amount.‘¹

Im Beitrag geht es daher nicht um die Frage nach der Herkunft und Beschaffenheit von Energie (der Transformationskraft), sondern um die Qualität der inhärenten Umwandlung von Energie in einem System. Als Leitmaxime für die Nutzung von Energie gilt der „energetische Imperativ“² des Nobelpreisträgers für Chemie Wilhelm Ostwald „Vergeude keine Energie, verwerte sie“ heute unwidersprochen. Im Beitrag geht es aber um die Verfügbarmachung von Energie für ein System was nicht dasselbe ist, wie die Nutzung selbst. Die Frage der Energieumwandlung in gegebenen Systemgrenzen ist ein mit dem wachsenden Ressourcenverbrauch der Welt einhergehendes, dringlicher werdendes Dauerthema.³

Energie hält die Dinge in Bewegung, wobei unterschiedliche Gleichgewichtsformen des Systems möglich sind: das „energetische Fließgleichgewicht“ zwischen einem offenen System und seinem Umfeldsystem, das von Energieunterschieden zwischen Innen und Außen profitiert, ist nicht zu verwechseln mit einem „thermodynamischen

¹ Feynman/Leighton/Sands (2007), S. 46

² Ostwald (1912), S. 85

³ „Das einzige, was wir im Moment mit Sicherheit feststellen können, ist, dass für unser winziges Sonnensystem und den Planeten Erde das Entropiegesetz „den höchsten Rang unter den Naturgesetzen“ einnimmt.“ Rifkin (1982), S. 60

Gleichgewicht“, in dem kein Energieaustausch zwischen System und Umfeldsystem mehr möglich ist.

Ein im Gleichgewichtszustand befindliches System ist im physikalischen Sinn nicht mehr arbeitsfähig.⁴ Unternehmen (synonym Betriebe) sind offene energetische Systeme, die neben Materie und Informationen vor allem Energie mit ihrem Umfeldsystem, dazu gehören Branche, Wirtschaft, und Gesellschaft, austauschen müssen, um ein thermodynamisches Gleichgewicht im kleinen zu verhindern.

Allgemeine Hinweise auf die Notwendigkeit später nutzbarer Energiedifferenzen sind nicht neu. So äußern sich Faber et al. bereits in den frühen 1980'er Jahren in diesem Sinne im Zusammenhang von Mülldeponien und Recycling: „Im Gegensatz zur diffusen Verteilung der in den Emissionen enthaltenen Rohstoffen auf den gesamten Umweltbereich wird also durch die kontrollierte Ablagerung in einer Deponie eine Reserve angelegt, auf die später zurückgegriffen werden kann. Diese vorsorgliche Maßnahme wirkt wie das Recycling der Entropiezunahme entgegen, weil die Rohstoffkonzentration in der Deponie höher ist als jene bei der diffusen Verteilung der Rohstoffe auf den gesamten Umweltbereich“.⁵ Diese „Energiereserve“ lässt sich thermodynamisch allerdings nur rechtfertigen, wenn der jeweilige aktuelle Energieaufwand zur Auflösung der Reserve nicht größer ist als die Reserve selbst.

Über den Zusammenhang von Entropie und Umweltschutz wurde bereits viel an anderer Stelle geschrieben; was bislang fehlt ist eine theoretische Betrachtung der Entropiewirkungen auf den betrieblich-systemischen Handlungsraum.

Auf welche Weise beeinflusst die Systementropie betriebliche Handlungsfelder? Das System ist die strukturelle Basis, d.h. Ordnungsmuster für den Zusammenhang von Handlung, Energie und Betrieb. Im System entsteht durch die Entropie Komplexität, d.h. strukturelle Vielschichtigkeit, die qualitative Rückwirkungen auf Handlungsalternativen hat.

Der vorliegende Beitrag zeigt im analytischen Umgang mit „betrieblichen Handlungsfeldern“ deren Entropiebezug auf; thermodynamische Gesetzmäßigkeiten müssen in der betrieblichen Entscheidungsdisposition Berücksichtigung finden, wenn das Überleben als System Zielsetzung der Betriebsführung sein soll. Eine hohe Entropie bedroht die Systemexistenz, weil sie den Handlungsspielraum einschränkt. Die Abschätzung der entropischen Wirkung betrieblicher Verhaltensweisen ist daher von elementarer Bedeutung für das Systemüberleben des Betriebes. Der Beitrag untersucht den Zusammenhang von Entropie, System und betrieblichen Handlungsfeldern. Die Analyse der Energie- bzw. Kraftdynamik im Zusammenhang

⁴ Vgl. Rifkin (1982), S. 46

⁵ Faber et al. (1983), S. 113

der Ordnungsstruktur des Systems ist essentiell für das Verständnis eines nachhaltigen Umgangs mit materiellen und immateriellen betrieblichen Ressourcen.

Der betriebliche Ressourceneinsatz findet, wie bereits erwähnt in einem thermodynamisch offenen System statt; die Entropie bezieht sich originär auf ein geschlossenes System. Dispositive und naturphysikalische Engpässe führen mehr oder weniger kontinuierlich zu einer Tendenz der Systemöffnung. Der Versuch einer Systemabschottung, die den Raum an Handlungsmöglichkeiten verkleinert, ist häufig ein zu beobachtendes Systemverhalten in Krisen. Unternehmen müssen die „Offenheit“ des Unternehmens als System in der physischen Materialversorgung, im informatorischen Datenfluss und energetischen Austausch, folgerichtig immer wieder aufs Neue organisieren, weil nur dann die Möglichkeit zum Entropieabbau und damit zum Überleben, gegeben ist. Physikalische Restriktionen, wie die Endlichkeit natürlicher Ressourcen, lassen aber auch eine Systemöffnung für den Entropieabbau durch den Bezug von Ressourcen von außen (z.B. aus der Branche), nicht ausreichen. Neben der Systemoffenheit für den Entropieabbau muss die Beachtung und Prüfung der entropischen Konsequenzen der eigenen betrieblichen Entscheidungen auf den Handlungsspielraum, hinzukommen. Nur so lässt sich der betriebliche Handlungszeitraum insgesamt verlängern.

2. Woher kommt die Entropie?

Die Thermodynamik behandelt das Verhalten physikalischer Systeme bei Temperaturänderungen, d.h. bei Wärmezufuhr und –abfuhr. Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik formulieren Gesetzmäßigkeiten über die Art und Weise des Verhaltens physikalischer Systeme. Das Verhältnis von Wärme und „der durch sie möglicher Weise hervorzubringenden Arbeit“ (Clausius, S. 368) ist dabei basaler Natur. Der 2. Hauptsatz führt das Konzept der Entropie ein.⁶

Der *1. Hauptsatz* der Thermodynamik betrifft die Energieerhaltung in einem geschlossenen [besser isoliertem] System⁷ und besagt:

⁶ Clausius selbst fasst folgende Zusammenfassung des 1. und 2. Hauptsatzes: „Vorläufig will ich mich darauf beschränken, als ein Resultat anzuführen, dass, wenn man sich dieselbe Grösse, welche ich in Bezug auf einen einzelnen Körper seine Entropie genannt habe, in consequenter [sic!] Weise unter Berücksichtigung aller Umstände für das ganze Weltall gebildet denkt, und wenn man daneben zugleich den anderen seiner Bedeutung nach einfacheren Begriff der Energie anwendet, man die den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechenden Grundgesetze des Weltalls in folgender einfacher Form aussprechen kann. 1) Die Energie der Welt ist constant. 2) Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“ Clausius (1865), S. 59

⁷ Vgl. Segrè (1990), S. 369f. Zur graduellen Geschlossenheit von Systemen siehe unten Kapitel „5. Entropie und Systemarten“.

$$\Delta U = Q + W$$

d.h. „Die Änderung ΔU der inneren Energie eines Systems ist gleich der Summe der ihm netto zugeführten Wärme Q und der ihm netto zugeführten Arbeit W “⁸

Die Summe aller Energien in einem geschlossenen System ist konstant. Die Bildung oder Vernichtung von Energie ist darin nicht möglich.⁹ In „differentieller Schreibweise, also für infinitesimale Änderungen“¹⁰ lautet der 1. HS der Thermodynamik

$$dU = dQ + dW \quad \text{1. Hauptsatz der Thermodynamik}$$

wobei die Variablen U für: innere Energie des Systems, dU für die Änderung der inneren Energie des betrachteten Systems, dW : für die Veränderung der Arbeit, die von außen als Energie in mechanischer Form als Arbeit zugeführt wird und dQ für die Wärmeenergiezufuhr, stehen. In der Lesart heißt die Gleichung: die Änderung der inneren Energie ist gleich der Summe aus Änderung der Wärme und der Änderung der Arbeit.

Innere Energie als Zustandsgröße:

dU : linke Gleichungsseite
Veränderung der inneren Energie des Systems
Zustandsgröße, unabhängig vom Weg, d.h. es ist für den Zahlenwert unerheblich, ob Wärme oder Arbeit zugeführt wurde.

$dQ + dW$: rechte Gleichungsseite
 dQ (Veränderung der Wärme),
 dW (Veränderung der Arbeit)
Möglichkeiten – am System verrichtete Arbeit (+),
zugegebene Wärme (+), vom System verrichtete Arbeit (-),
abgegebene Wärme (-)

Mit anderen Worten: „Es lässt sich Arbeit in Wärme und umgekehrt Wärme in Arbeit verwandeln, wobei stets die Größe der einen der der anderen proportional ist.“¹¹

⁸ Tipler/Mosca (2012), S. 704

⁹ Vgl. Feynman (2001), S. 147, 162, 198

¹⁰ Tipler/Mosca (2012), S. 705. „In dieser Gleichung ist dU das Differential der Zustandsfunktion U , während weder dQ noch dW als Differentiale angesehen werden können. Sie symbolisieren vielmehr nur eine infinitesimale Änderung der ausgetauschten Wärme Q bzw. der verrichteten Arbeit W .“ Tipler/Mosca (2012), S. 705

¹¹ Clausius, (1850a), S.7, verlegt 1898; Clausius (1876), S. 25; vgl. Clausius (1850b), S. 369f. und 383, zur Proportionalität von Wärme und Arbeit. Vgl. Clausius (1867), S. 1f.

Aufgrund des 1. HS kann es kein *Perpetuum mobile der 1. Art*, das wäre eine Maschine, die Energie aus Nichts produziert, geben.¹² In der Zusammenfassung des 1. Hauptsatzes zur Energieerhaltung gilt nämlich: Kontinuierlich wiederkehrende Bewegung lässt sich nicht mittels irgendwelcher Konstruktionen aus dem Nichts erzeugen. Im geschlossenen System kann die vorhandene Energie nur transformiert werden. Kommt es dennoch zu Bewegung so ist sie nicht wiederkehrend, ohne dass an irgendeiner Stelle Energie aus dem Umfeldsystem dem System zugeführt wird, was wiederum die Annahme des geschlossenen Systems verletzt.

Der 2. *Hauptsatz* der Thermodynamik behandelt mit der *Entropie* (Umwandlung) (S), ebenfalls beziehend auf ein geschlossenes System, die Richtung der Energieumwandlung. Die Entropie gibt Auskunft darüber, wie und in welchem Ausmaß die Energieumsetzung in Systemen passiert. Sie ist gleichsam „Antriebskraft“ der Umwandlung von Energie in mechanisierte Arbeit. Wärme fließt nicht vom Kälteren zum Wärmeren, sondern vom Wärmeren zum Kälteren¹³. Veranschaulichen lässt sich das am Beispiel des Umgangs mit einem Kühlschrank. Denselben offen stehen zu lassen empfiehlt sich energetisch nicht, weil die Kälte entweicht, sondern weil die Außenwärme in den Kühlschrank hineinströmt.

$$\Delta S_{abgeschlossen} \geq 0 \quad \text{2. Hauptsatz der Thermodynamik}$$

Die Gesetzmäßigkeit der einseitigen Umwandlungsrichtung von Energie lässt sich nur durchbrechen, wenn zusätzliche Energie von außen dem System zugeführt wird. Die Entropieänderung (dS) entspricht einer Änderung der Wärmemenge (dQ) im Verhältnis zur Temperatur.

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Demnach ist die Übertragung von (Rest-)wärme von einem kälteren auf einen wärmeren Körper nicht ohne mechanische Arbeit möglich. Ein thermodynamisch

¹² „Es ist unmöglich, weder durch mechanische, thermische, chemische oder andere Konstruktionen, kontinuierlich wiederkehrende (perpetuierende) Bewegung aus dem Nichts zu erzeugen. Es ist unmöglich, eine $dQ + dW$ zyklisch arbeitende Maschine (Perpetuum mobile 1. Art) zu konstruieren, die kontinuierlich Arbeit oder kinetische Energie aus Nichts erzeugt“, Planck (1964)

¹³ „Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen“, Clausius (1876), S. 81 oder Clausius (o.J.), S. 22/23. Vgl. Clausius (1850b), S. 371, Clausius (1867), S. 9

stabiles Gemisch beispielsweise lässt sich ohne Energiezufuhr von außen nicht wieder entmischen.

Ein *Perpetuum mobile der 2. Art*, das wäre eine Maschine, die Restwärme aus dem Kälteren, dem Wärmeren zuführt, also z.B. eine Wärmekraftmaschine eines Schiffes die Restwärme aus dem kalten Meerwasser zieht und als Antriebsleistung nutzt, funktioniert demnach nicht. Die Unmöglichkeit eines ‚perpetuum mobile‘ beschreiben Ernst et al. Es ist unmöglich, dass „Wärme von einem kühleren zu einem wärmeren Reservoir fließt, ohne dass dabei äußere Arbeit geleistet, also Energie zugeführt wird.“

¹⁴

Die Entropie ist somit nicht nur ein Umwandlungsmaß, sondern auch ein „Maß für die Reversibilität einer Erscheinung“, d.h. es ist ein Maß der Prozessbeschreibung, die ausdrückt in welche Richtung ein Prozess abläuft.¹⁵

Daneben sagt die Entropie etwas über die Zustandsqualität eines Systems aus: „Als Maß für die Umwandlung eines Systems verwendet man eine Größe die als Entropie bezeichnet wird. Die Entropie S ist eine Zustandsfunktion [...]. Auch die Entropie hängt also nur vom Zustand des Systems ab, nicht aber vom Weg, auf dem dieser erreicht wurde. Wie bei der potenziellen Energie ist bei der Entropie vor allem ihre Änderung interessant. Die infinitesimale Entropieänderung eines Systems, das von einem Zustand in einen anderen übergeht ist

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

Darin ist dQ_{rev} die Energie, die dem System in einem reversiblen Prozess netto als Wärme zugeführt wird. Wenn dQ_{rev} negativ ist, das System also Wärme abgibt, dann ist auch die Entropieänderung des Systems negativ.“¹⁶

Die Messung des Unterschieds zwischen zwei Systemzuständen ergibt die Entropie. In der ausdrücklichen Wiederholung betonen Tipler/Mosca weiter: „Weil die Entropie eine Zustandsfunktion ist, hängt die Entropieänderung nur vom Anfangs- und Endzustand ab, nicht aber davon auf welchem Weg und durch welche Prozesse das System von einem Zustand in einen anderen gelangt.“¹⁷

Entropie beschreibt aus dem thermodynamischen Grundverständnis heraus den „Ordnungszustand der Energie“¹⁸ bzw. den „gesetzmäßigen Ordnungsverlust der

¹⁴ Ernst et al. (2016), S. 64

¹⁵ Segrè (1990), S. 368, vgl. Segrè (1990), S. 370

¹⁶ Tipler/Mosca (2012), S. 752

¹⁷ Tipler/Mosca (2012), S. 752

¹⁸ Popper/Kreuzer (1986), S. 97

Energie“¹⁹ im Sinne einer Verfügbarkeit oder umgekehrt ausgedrückt den Grad an bereits erfolgter Gebundenheit der Energie.

Irreversibilität und Entropie

Unterscheiden lassen sich *reversible* und *irreversible* Prozesse einer Systemstruktur. Bei reversiblen Prozessen in einem geschlossenen System ist die Entropie konstant, d.h. sie wird weder gebildet noch vernichtet.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q_{rev}}{T}$$

Q_{rev} : Wärmemenge bei reversiblen Prozess; T : Temperatur

Irreversible Prozesse in geschlossenen Systemen sind Prozesse, die Ausgleichs-, Mischungs-, oder Reifungsprozesse betreffen. Ohne zusätzliche Arbeit/Energie von außen ist eine irreversible Vorgangsweise unumkehrbar. Die energetische Irreversibilität ökonomischer Produktionsprozesse ist seit langem bekannt.²⁰ Die Entropie nimmt zu.²¹ Beispielhaft für ein derartiges irreversibles Prozessverhalten sind „verbrennendes Holz“ oder „rostendes Metall“.

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q_{irrev}}{T}$$

Q_{irrev} : Wärmemenge bei irreversiblen Prozess; T : Temperatur

Alle natürlichen Prozesse sind *irreversibel*, d.h. ohne zusätzliche Arbeit bzw. Energie von außen sind sie nicht umkehrbar. Die Entropie wächst. Jeder irreversible verlaufende Prozess trägt zur Entropiezunahme der Welt als Gesamtes bei, was im „Wärmetod“ der Welt mündet. Mit den Worten von Clausius ausgedrückt: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“²² Die Energieumwandlung führt zu einer Energiefestlegung.

Unter „Wärmetod“ wird ein Endzustand des Weltalls beschrieben, in dem alle Temperaturdifferenzen ausgeglichen sind und keine Energieumwandlung mehr möglich ist. Das sogenannte thermodynamische Gleichgewicht bedeutet das Ende

¹⁹ Popper/Kreuzer (1986), S. 46

²⁰ Vgl. Faber et al. (1983), S. 83, Georgescu-Roegen (1987)

²¹ Vgl. Segrè (1990), S. 372f.

²² Clausius (1867), S. 16, vgl. Seelinger (1909), S. 16. Vgl. auch Rifkin (1982), S. 47, 51. Mit den Worten von Rifkin: „Das Entropiegesetz besagt, dass die Evolution die gesamte für das Leben auf diesem Planeten verfügbare Energie dissipiert.“ Ebenda, S. 70

jeglicher Veränderung/Entwicklung.²³ Diese Zustandsbeschreibung für ein thermodynamisch abgeschlossenes System ist umstritten, weil die Systemgrenzen des Weltalls nicht endgültig erfassbar sind.²⁴

Fassen wir zusammen: mit der Entropie geht es um Wärmeenergieunterschieden, die Richtung des Energieflusses (vom kälteren auf den wärmeren Körper), die Tatsache, dass irreversible Prozesse eine zunehmende Entropie haben und den Zusammenhang, dass im thermodynamischen Gleichgewicht die Entropie ihre maximale Ausprägung erfährt. Der 1. HS der Thermodynamik erklärt den Energieerhalt für das geschlossene System in Summe. Die Richtung der Energietransformation von Energie verläuft vom wärmeren zum kälteren Körper hin, theoretisch ist, da der 1.HS hier keine Einschränkung vornimmt, auch der umgekehrte Weg vorstellbar, tatsächlich aber wurde die Umkehrung noch nie beobachtet. Jene Gerichtetheit der Energietransformation (vom wärmeren zum kälteren Körper hin) ist mit dem 2.HS der Thermodynamik, der Entropieeigenschaft oder Entropiefunktion, zum Ausdruck gebracht. Der 2. HS ist eine Zustandsfunktion, d.h. unabhängig davon, wie der Zustand erreicht wurde, gilt er. Es gilt nun zu prüfen welche Bedeutung eine zunehmende respektive abnehmende Entropie für die Handlungsebene hat.

3. Der Beitrag von Ludwig Boltzmann zur Entropie als Maß für Handlungsmöglichkeiten

Entropie ist das Maß für den Umfang an nicht verfügbarer Energie in einem System. Für das geschlossene System nimmt der Umfang verfügbarer Energie im Zeitablauf ab. Endpunkt dieser Entwicklung ist der wahrscheinlichste Zustand den ein System einnehmen kann, nämlich derjenige maximaler Entropie, was dem thermodynamischen Gleichgewicht entspricht (unwahrscheinlichere Zustände sind durch geringe Entropie gekennzeichnet, z. B. dass rostendes Metall sich selber entrostet). Das Gleichgewicht bedeutet eine gleiche Verteilung der energetischen Moleküle im Raum. Hingegen im Ausgangszustand sind die Moleküle im Raum ungleich verteilt, was landläufig als „ordentlich“ eingestuft wird (i.S.v. die einen Moleküle hier, die andern dort, wie im Fall einer Box mit Schieber, in der einen Kammer befinden sich die Kugeln, nicht aber in der anderen). Das bekannte Beispiel der Verteilung von Gasmolekülen in einem geschlossenen Behältersystem zeigt: zu Beginn sind die Gasmoleküle in einem durch einen Schieber abgetrennten Kammer des Systems; in der anderen Kammer sind keine Moleküle. Wird der Schieber geöffnet beginnen sich die Gasmoleküle im gesamten System zu verteilen.

²³ Vgl. Schrödinger (1951), S. 103f.

²⁴ Vgl. Althaus (2009), S.261, o.V. (2003), Sp. 8200 f., Segrè (1990), S. 374, Faber et al. (1983), S. 90.

Dazu die Einschätzung von Stephen W. Hawking: „Etwas später könnten sie sich zufällig alle in der rechten oder wieder in der linken Hälfte befinden, doch es ist viel wahrscheinlicher, dass sich eine im Großen und Ganzen gleiche Zahl in beiden Hälften befindet. Ein solcher Zustand ist weniger geordnet – oder ungeordneter – als der ursprüngliche Zustand, bei dem sich alle Moleküle in der einen Hälfte befanden.“²⁵

Im Gleichgewicht existieren keine nutzbaren Energiedifferenzen mehr, was das Ende jeglicher energetisch, physikalischer Bewegung bedeutet. Ein System im thermischen Gleichgewicht befindet sich daher in maximaler Unordnung, d.h. die Moleküle sind alle über die gesamte Box gleichermaßen verteilt.²⁶

Boltzmann verbindet die Entropie mit der Unordnung, d.h. mit dem Zustand einer gleichmäßigen Verteilung der Moleküle.²⁷

Das Maß an „Unordnung“ ist mit der Entropie als Ordnungsgrad dargestellt: „...haben wir gesehen, dass die Entropie ein Maß dafür ist, wie hoch der Ordnungsgrad des betrachteten Systems ist. Ganz entscheidend ist nun die Tatsache, dass ein Zustand höherer Ordnung mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit auftritt, ein Zustand geringerer Ordnung dagegen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit.“²⁸

Nach dem 1. HS der Thermodynamik ist es theoretisch möglich, dass das System von einem Zustand geringerer Ordnung alleine zu einem Zustand höherer Ordnung zurückfindet, aber dieser Vorgang ist extrem unwahrscheinlich (eine durch Steinwurf zersprungene Fensterscheibe setzt sich nicht von allein in einer Umkehrung des Prozesses wieder zusammen!).²⁹

„Die Entropie hängt mit der Wahrscheinlichkeit des betreffenden Zustands zusammen. Ein Zustand höherer Ordnung tritt mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit auf, ein Zustand geringerer Ordnung dagegen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit. Ein isoliertes, sich selbst überlassenes System nimmt einen Zustand hoher Wahrscheinlichkeit, geringerer Ordnung und hoher Entropie an.“³⁰

Abgeleitet ist diese Einschätzung aus der Boltzmann Behauptung die besagt, dass die Entropie eines Systems (S) in einem Makrozustand dem Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit W des zugehörigen Mikrozustandes

²⁵ Hawking (1988), S. 133

²⁶ Vgl. Popper (1984), S. 231

²⁷ Vgl. Popper (1984), S. 229

²⁸ Tipler/Mosca (2012), S. 760

²⁹ Vgl. Tipler/Mosca (2012), S. 760f.

³⁰ Tipler/Mosca (2012), S. 765

proportional ist.³¹ Der später als Boltzmanns Epitaph bekannt gewordene Zusammenhang drückt sich formal aus als

$$S = k \log W$$

S steht für Entropie, W für Wahrscheinlichkeit eines Zustandes, wobei k konstant, die sogenannte Boltzmann-Konstante ist, die für physikalische Fragestellungen wichtig, für die vorliegende Argumentation aber nicht weiter von Bedeutung ist.³²

Die auch als Boltzmann Postulat bezeichnete Aussage beschreibt die grundlegende thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Systems:

„Von allen Verteilungen der Moleküle auf räumliche Positionen und mögliche Geschwindigkeiten wird sich wegen der Zusammenstöße als Gleichgewicht ein Zustand mit einer gleichmäßigen Verteilung einstellen. Dieser Zustand größter „Unordnung“ besitzt die größte Wahrscheinlichkeit (L. Boltzmann, 1866).“³³

Mit der Gleichung wird zum Ausdruck gebracht, dass nicht nur eine Tendenz für die Gleichverteilung von Molekülen im Raum besteht, sondern auch, dass dem einzelnen Molekül die Kraft innewohnt, dem Zustand der Gleichverteilung im Raum anteilig nachzukommen.

Systemtheoretisch interpretiert drückt das Boltzmann Epitaph aus, dass energetische Veränderungen auf Ebene der Systemelemente eine energetische Veränderung der gesamten Systemstruktur bedeuten. Betriebswirtschaftlich argumentiert und übersetzt heißt das: jede kleine strukturelle Veränderung bei Energie, Materie und Informationen in irgendeinem Funktionsbereich, hat eine unmittelbare Auswirkung auf die Gesamtstruktur des Betriebes. Beispielsweise stehen die Milliarden € Rückstellungen der Automobilhersteller zur Bewältigung des Abgasskandals nicht mehr für Investitionen in alternative Antriebskonzepte zur Verfügung. Anders ausgedrückt lässt sich auch formulieren: die auf der Betriebsebene nutzbaren Möglichkeiten bewegen sich in Abhängigkeit von den Möglichkeiten einer Einzelsituation auf der Mikrostrukturebene.

³¹ Vgl. Mainzer (2010), S. 36, Giancoli (2010), S. 717

³² Segrè (1990), S. 439; wobei die Konstante: $k = 1,3805 \times 10^{-16} \text{ erg} (\text{°K})^{-1}$. Die Boltzmann-Konstante k gibt in der Thermodynamik und statistischen Mechanik pro Freiheitsgrad eines Teilchens die Änderung der doppelten mittleren Energie je Temperaturgrad an. Die Konstante ist eine relevante Größe bei Vergleichen thermodynamischer Energie mit anderen Energieformen und ein Umrechnungsfaktor von der rein thermodynamischen Kelvinskala zur statistisch-dynamischen Skala. Ein Epitaph ist ein Gedenktafelspruch, wie er beispielsweise auf Boltzmanns Grab zu finden ist.

³³ O.V. (2003), Sp. 1807

Zusammengefasst gilt also: der Abbau nutzbarer Differenzen ist sehr wahrscheinlich. Zudem bewirkt der Mikrozustand einer Handlung/Ereignisses auch eine Veränderung für den Makrozustand des Systems. Mit anderen Worten mit jeder einzelnen zusätzlichen Handlung wird die Möglichkeit für das Ganze (System) Handlungen zu treffen, verkleinert. Gibt es aus thermodynamischer Sicht einen Ausweg aus dem Paradoxon mit jeder Einzelhandlung den Raum an Handlungsmöglichkeiten zu verringern? Einen Ansatz bietet die im Folgenden zu thematisierende Negentropie.

4. Negentropie und das (betriebliche) Leben

Erwin Schrödinger, Nobelpreisträger für Physik, übernahm vor dem Hintergrund des Entropieverständnisses von Boltzmann, den Gedanken der „negativen Entropie“, der die Aufbaufähigkeit von Organisationen oder den Aufbau von Ordnung, zum Ausdruck bringt.³⁴ Der Physiker Léon Brillouin wiederum prägte für die negative Entropie den Begriff der „Negentropie“, die freie, nutzbare Energie in einem physikalischen System bezeichnet. Der Anthropologe Helmuth Plessner sieht in der Ektropie, ein weiterer synonyme Begriff für die negative Entropie, die „Tendenz, den Ordnungszustand eines lebendigen Systems durch assimilatorische Vorgänge zu erhöhen“³⁵.

Nach Schrödinger nimmt „Leben“ negative Entropie alias Negentropie auf, um existieren zu können und exportiert Entropie. Negentropie-Import ist gebunden an den Entropie-Export. Leben ernährt sich von negativer Entropie.³⁶

Karl Popper bestreitet, dass der Umstand eines Imports von Negentropie charakteristisch für das Leben ist, denn technische Artefakte, wie beispielsweise eine Ölheizung ziehen auch negative Entropie aus ihrem Umfeld, wenn sie negative Entropie, z.B. in Form von Öl aus ihrem Umfeldsystem verarbeiten.³⁷ Der Import von Negentropie aus dem Umfeld ist daher kein Alleinstellungsmerkmal für das Leben,

³⁴ Vgl. Schrödinger (1951), S. 101

³⁵ Plessner (1975), S. 198

³⁶ Vgl. Schrödinger (1951), S.103f. Schrödinger: „Damit erhöht ein lebender Organismus ununterbrochen seine Entropie – oder, wie man auch sagen könnte, er produziert eine positive Entropie – und strebt damit auf den gefährlichen Zustand maximaler Entropie zu, der den Tod bedeutet. Er kann sich ihm nur fernhalten, d.h. leben, indem er seiner Umwelt fortwährend negative Entropie entzieht – welches etwas sehr Positives ist, wie wir gleich sehen werden. Das, wovon ein Organismus sich ernährt ist negative Entropie. Oder, um es etwas weniger paradox auszudrücken, das Wesentliche am Stoffwechsel ist, daß es dem Organismus gelingt, sich von der Entropie zu befreien, die er, solange er lebt, erzeugen muß.“ Schrödinger (1951), S. 100f. Oder: „Das Mittel, mit dessen Hilfe ein Organismus sich stationär auf einem ziemlich hohen Niveau von Ordnung (=einem ziemlich niedrigen Niveau von Entropie) hält, besteht tatsächlich darin, daß er ständig Ordnung aus seiner Umgebung saugt.“ Schrödinger (1951), S. 104

³⁷ Vgl. Popper (1984), S. 198; Popper/Kreuzer (1986), S. 52

sondern gilt für alle Formen offener Systeme. Das Konzept der Negentropie betont die extreme Abhängigkeit offener Systeme von ihrem Umfeldsystem.

Negentropie steht, wie bereits betont, für den Aufbau von Ordnung im System. Inhaltlich bezieht sich Negentropie konkret auf „nutzbare Energie“, nutzbare „Temperaturdifferenzen“ oder bestehende „Energieumwandlungsmöglichkeiten“.

Negentropie bedeutet also Aufbau von Ordnung durch Aufbau von Differenzen und eine Abhängigkeit vom Umfeld. Betroffen ist im Kern die Auseinandersetzung um die Möglichkeit zur Entropieabgabe an das Umfeldsystem. Der Aufbau von Ordnung zeigt sich exemplarisch im Verständnis der informationstheoretischen Perspektive auf Entropie bzw. Negentropie.

Energie, Materie und Informationen sind die physikalisch-stofflichen und ideellen Grundlagen des Lebens, die zwischen Systemen ausgetauscht werden. Für einen exemplarischen Produktionsbetrieb mit seinem Wertschöpfungsprozess ist vor dem Hintergrund der gemachten Ausführungen Negentropie auf vielseitige Weise existenziell als Unterstreichung der Abhängigkeit vom Umfeldsystem relevant: auf der materiellen Ebene mit dem Bezug zu Betriebsmitteln, Hilfsstoffen, Rohstoffen, Zulieferteilen, auf der energetischen Ebene mit dem Bezug zu technischen Gasen, Wasser, Heizwärme, Licht, ausführenden und dispositiven Tätigkeiten und auf der informatorischen Ebene mit Bezug zu Patenten, Lizenzen, Konzessionen, Konstruktionszeichnungen, rückkoppelnden Meinungen von Kunden, Lieferanten und Wettbewerbern, um nur einige unmittelbar relevante Bezüge zu nennen.

Wilhelm Ostwald bringt den Wettbewerb um die Nutzungsmöglichkeit verfügbarer und damit begrenzter Energie treffend zum Ausdruck: „Alles Leben erweist sich als ein Wettbewerb um die freie Energie, deren zugängliche Menge beschränkt ist.“³⁸

5. Entropie und Systemarten

Die Unterschiedlichkeit der Systemarten prägt die Analyseweise thermodynamischer Prozesse in und zwischen Systemen. Im Zusammenhang von Betrieben ist die Beschreibung der zugrundeliegenden Systemart, die je nach Beobachterperspektive variiert, Ausgangsbasis für die Entropiebewertung. Aussagen zum Grad der Systemoffenheit und dem inhaltlichen Systembezug, lassen sich ableiten.

³⁸ Ostwald, zit. bei: Knizia (1986), S. 252

Geschlossene, isolierte und offene Systeme

Offene Systeme lassen den Austausch von Energie, Materie und Informationen uneingeschränkt zu. Bei geschlossenen Systemen kann Energie (Wärme und Arbeit) die Systemgrenzen überschreiten, nicht aber Information und Materie. Bei geschlossenen Systemen ist daher wegen der Austauschmöglichkeit von Energie das dazugehörige Umfeldsystem in die Analyse einzubeziehen.

Geschlossene, isolierte Systeme lassen keinerlei Austausch mit der Umgebung zu, sie sind energiedicht abgeschlossen.³⁹

Der Grad an Systemoffenheit verändert die Möglichkeit des Systemüberlebens (siehe Tabelle 1): nur ein offenes System ist in der Lage durch die ausreichende Hereinnahme von Energie von außen zu einem Entropieabbau zu kommen, der den Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts eines geschlossenen Systems, hinauszögert.

³⁹ Vgl. Segrè (1990), S. 372

Tabelle 1: Entropie im offenen und geschlossenem System

Abgeschlossenes System (ohne Energie- und Massenaustausch)	Offenes System
Im geschlossenen System ist die Entropie konstant oder zunehmend; sie kann aber nicht abnehmen.	In offenen Systemen kann die Entropie sinken, weil die Möglichkeit des Austauschs mit dem Umfeldsystem gegeben ist. Es besteht aber auch die Möglichkeit zu gleichbleibender oder zunehmender Entropie.
<ul style="list-style-type: none"> Entropie konstant bei reversiblen Prozessen. $dS = \frac{dQ}{T}$ <p style="text-align: center;"><i>S: Entropie</i> <i>dQ: Zu- und abgeführte Wärmemengen</i> <i>T: Temperatur, bei der der Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Entropie zunehmend bei irreversiblen Prozessen. 	
	Unter Berücksichtigung des kleinen und großen Systemzustands gilt: Der Makrozustand eines offenen Systems kann stationär sein, wenn laufend im Mikrozustand Materie und Energie abgeben und aufgenommen wird (Fließgleichgewicht). ⁴⁰
<ul style="list-style-type: none"> Ein Prozess mit steigender Entropie verläuft von selbst (Selbstorganisation). Wenn nicht anderweitig Energie zugeführt wird, ist der Vorgang nicht rückgängig zu machen (irreversibler Vorgang).⁴¹ 	

Der Status „Fließgleichgewicht“ drückt aus, dass kleine Schwankungen von Materie, Energie und letztlich auch Informationen möglich sind, aber im Mittel bleibt der Zustand offener Systeme unverändert, d.h. es kommt nur so viel in das System, wie an anderer Stelle wieder austritt. Die Betonung der mikro- und makroskopischen Ebene macht deutlich, dass offene Systeme in ihrer Entwicklung temporäre Fließgleichgewichte kennen, die nicht, wie bereits betont, mit dem „thermodynamischen Gleichgewicht“, dem finalen Endpunkt der Entwicklung, zu verwechseln sind.

Die letzte Zeile der Tabelle unterstreicht: die Zunahme der Entropie ist strukturell unaufhaltsam, es sei denn Energie kann von einem übergeordneten System (Umfeldsystem) dem System von außen zugeführt werden. Irreversible Prozesse sind aus Systemperspektive selbstorganisierende Prozesse mit Entropiezunahme. Eine

⁴⁰ Vgl. Gloy (2006), S. 194; Krcal (2003), S. 7; Bossel (1990), Wachter/Hausen (1977), S. 105

⁴¹ Vgl. Mahnke/Schmelzer/Röpke (1992), S. 180

thermodynamische entropiesteigernde Selbstorganisation ist daher für den Systemerhalt gefährlich, weil zukünftige Handlungsmöglichkeiten reduziert werden. Im Gegensatz dazu steht die handlungsbezogene Selbstorganisation der sozialen Systemtheorie, die über die Differenzenbildung, d.h. durch Selektion von Beziehungen, Entwicklungsmöglichkeiten für den Systemerhalt schafft.

Greifen wir die Frage der Geschlossenheit, Offenheit und Isoliertheit von Systemen noch einmal auf, um zu verdeutlichen, wie Systemoffenheit, über alle unterschiedlichen Systemarten hinweg, von entscheidender Bedeutung für das Systemüberleben ist.

Die Durchlässigkeit von Materie, Information und Energie im Betriebskontext kann sich variierend auf nachfolgend aufgeführte, inhaltliche Systemperspektiven beziehen:

- Ein „technisches System“ ist eine Struktur, die aus Werkzeugen, Maschinen, Apparaturen und Automationsprozessen besteht; die Betonung der Zusammengehörigkeit der Komponenten ist für das Verständnis entscheidend.⁴²
- Ein „soziotechnisches System“ ist eine die Bedingtheit und Anforderungen des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine betonende Struktur.⁴³
- Ein „soziales System“ ist eine ausschließlich durch Kommunikation konstituierte Struktur.⁴⁴
- Ein „produktives soziales System“ ist eine Struktur, die etwas Angestrebtes (Ware, Gut, Dienstleistung, Handlung), hervorbringt.⁴⁵
- Ein „psychisches System“ ist eine reflektierende, denkende empfindende Bewusstseinsstruktur.⁴⁶
- Ein „biologisches System“ ist die Gesamtheit einer lebenden Struktur, z.B. der Mitarbeiter/Arbeitskraft als Mensch.⁴⁷

Mit der Eigenschaft der „Geschlossenheit“ in Kombination mit Eigenschaften des „Sozialen“ oder des „Produktiven“ drängt sich die Frage nach dem Systemüberleben auf, wie sich am Beispiel eines Unternehmens verdeutlichen lässt: Ein Unternehmen als geschlossenes System wäre ein System, das nur aus sich heraus, ohne externe Lieferquellen an Material, Information, Energie, oder Arbeit existieren könnte – ein derartiges System des perpetuum mobile der 1. Art kann es aber aufgrund der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten nicht geben. Ein produktives System benötigt

⁴² Vgl. Ropohl (2009)

⁴³ Vgl. Ropohl (2009), S. 58-59, Trist/Bamforth (1951), pp. 3-38

⁴⁴ Vgl. Luhmann (2002), S. 78

⁴⁵ Vgl. Ulrich (1968)

⁴⁶ Vgl. Luhmann (2005), S. 118

⁴⁷ Vgl. Schuster/Eils/Prank (2004), S. 71-74

Informationen, Energie und Materie von außen für das Überleben und basiert damit immer auf einer offenen Systemart.⁴⁸

Den Unterscheidung nach geschlossenem und isoliertem System im Hinblick auf die Durchflussmöglichkeit von Energie unterstreicht das nachstehende Beispiel: Ein geschlossenes, aber nicht „abgeschlossenes“ i.S.v. isolierten sozialen System Unternehmen, das tatsächlich durchlässig ist für Energie und Informationen besteht beispielsweise im Fall einer strikten Zuständigkeitsregelung mit Einhaltung des Dienstweges, der Einführung einer Verschwiegenheitsklausel im Arbeitsvertrag, oder im Fall der Beachtung einer Geheimhaltungsverpflichtung. In den genannten Fällen kann eine Umgehung, Verletzung oder Bruch der Regelung nicht ausgeschlossen werden. Das inoffizielle „Durchsickern“ z. B. durch Spionage, narrative Geschichten, Unachtsamkeit usw. ist eben ein Beleg für die nicht vorhandene Isoliertheit von offiziell „geschlossenen sozialen Systemen“.

Ein „isoliertes soziales System“ Unternehmen ist abgeschottet von Branche und Gesellschaft, in Unkenntnis von Veränderungen – mit anderen Worten das Unternehmen befindet sich in der Unternehmenskrise, die zur Insolvenz führt.

Ein „offenes soziales System“ ist gekennzeichnet durch die gleichzeitig wirkende Vielzahl von sich überlappenden Themenfeldern. Auf der Ebene der Mitarbeiterkommunikation beispielsweise lässt sich die Verbindung privater mit unternehmensspezifischen Themen, nicht ausschließen.

Nachdem die Themen Systemordnung bzw. Systemarten und Entropie behandelt wurden, geht es im Folgenden um den Zusammenhang von Entropie und Systemkomplexität der den Energiebedarf und die Energieverwendung eines Systems nachdrücklich beeinflusst.

6. Der Zusammenhang von Entropie und Systemkomplexität

Entropie ist ein Faktor, der Systemkomplexität (d.h. Vielfalt der Strukturebenen) hervorruft. Gleichzeitig ist Entropie auch Ausdruck der Irreversibilität von Prozessen die das komplexe System erzeugt. Mit anderen Worten Entropie ist Ursache und Wirkung von Systemkomplexität zugleich.

Übersetzt in die Betriebswelt heißt das die Kraftqualität eines Betriebes verursacht betriebliche Komplexität und dieselbe ihrerseits begründet wiederum neue Komplexität

⁴⁸ „Neg-entropische Evolution ist nur in energiedurchfluteten Systemen, wie unser Planet eines ist, möglich.“
Popper/Kreuzer (1986), S. 51

(z.B. Vorgänge, die Bürokratie notwendig machen und sogleich damit eine Beharrungstendenz der Bürokratie verstärken (siehe das Parkinsonsche Gesetz⁴⁹)).

Eine zentrale Grundlage für die Entropie als Komplexitätstreiber sozialer Systeme ist die informationstheoretische Interpretation des Entropiebegriffs; sie betont die Informationsmenge, die zur Spezifizierung einer der Mikrozustände in einem bestimmten Makrozustand benötigt wird.⁵⁰ Dabei gilt, je mehr Informationen zur Beschreibung des Systemzustands via Mikrozustände und zur Identifikation der Abhängigkeiten in der Systemrückkopplung notwendig sind, umso höher ist die Entropie des Systems.

Speziell in der statistischen Mechanik der Physik thematisiert der Entropiebegriff die Anzahl aller möglichen Mikrozustände eines Makrozustands. Der Makrozustand eines Systems (beschrieben durch gemittelte Parameter, wie z.B. die Temperatur, kann durch verschiedene Mikrozustände dargestellt werden. Entropie hängt dabei von der Wahrscheinlichkeit der Mikrozustände ab.

Je größer die Anzahl der Mikrozustände, desto höher ist die Entropie des Makrozustands, also desto größer ist die fehlende Information über den Zustand des Systems.⁵¹ Der Makrozustand weist gegenüber dem Mikrozustand hinsichtlich der Molekülestruktur einen Mangel an Information auf.

Für Gell-Mann entspricht Entropie deshalb auch einem situativen „Maß der Unwissenheit“.⁵² Komplexität durch Entropie bezeichnet das „was man a priori über ein System wissen könnte“⁵³, aber noch nicht weiß, aber was auch im Nachhinein nicht eindeutig gewusst werden wird.⁵⁴

Bei „Informationen“ als Bezugsgröße der Entropie gilt in Bezug auf Quantität und Qualität folgendes Verhältnis:

Die Entropiehöhe variiert invers zu der Informationsmenge, d.h. hohe Entropie besteht bei geringer Information und niedrige Entropie bei hoher Information. Für das Verhältnis zu Negentropie gilt: hohe Entropie ist niedrige Negentropie und vice versa. Der Gehalt einer Informationszunahme liegt mehr im höheren Ordnungsgrad, weniger in der Informationsmenge begründet. Große Negentropie bedeutet einen hohen

⁴⁹ Vgl. Parkinson (1997), S. 17-30, „(1) Jeder Beamte oder Angestellte wünscht die Zahl seiner Untergebenen, nicht aber die Zahl seiner Rivalen zu vergrößern, und (2) „Beamte oder Angestellte schaffen sich gegenseitig Arbeit“, S. 21

⁵⁰ Vgl. Bliss (2000), S. 105, 108

⁵¹ Vgl. Müller (2014), S. 298

⁵² Vgl. Bliss (2000), S. 108, Gell-Mann (1994), S. 312

⁵³ Binswanger (1994), S. 169, vgl. Bliss (2000), S.107

⁵⁴ Vgl. Bliss (2000), S. 108

Informationsgehalt in der Zeichenfolge. Negentropie läßt sich als Maß nutzbarer, d.h. in geordneter Zeichenfolge (nach syntaktischen und semantischen Ordnungen) befindlicher Informationen, interpretieren.

Aus informationstheoretischer Perspektive ist in einer zufälligen Zeichenfolge die Negentropie klein (wenig Informationsgehalt), bei einer großen Negentropie steckt viel Information in einer Zeichenfolge, die durch syntaktische und semantische Ordnungen ihren Sinn erhält. Informationen sind subjektbezogen, gebunden an das Kodierungs- und Dekodierungsvermögen des Senders und Empfängers.

Der Erhalt der nutzbaren Unterschiede/Differenzen und der Ordnungsgehalt von Informationen sind jeweils abhängig vom konkreten Systembezug, der die institutionelle Strukturbasis für die Analyse der (Kraft-)Energietransformation bildet.

Jenseits der Popperschen Kritik am informationstheoretischen Entropieverständnis, auf die unten speziell eingegangen wird, ist in der Physik offenkundig die quantitative Feststellung der Entropie von Makrozuständen als Information durchaus üblich (siehe das 8. Kapitel).

Im Zusammenhang der Eigenschaft der Entropie als „Maß der Unwissenheit“ bedarf es einer thematischen Unterscheidung zu „Emergenz“ und „Kontingenz“, die im weitesten Sinne gleichermaßen vom Umgang mit „Gewissheit“ handeln: Entropie ist wie bereits erwähnt eine Ursache für Systemkomplexität, die für strukturelle Vielfalt steht. Emergenz als Wirkung gehört zu den Verhaltenseigenschaften komplexer Systeme. Sie bringt zum Ausdruck, dass das Verhalten des gesamten Systems nicht aus dem Verhalten seiner Subsysteme oder Elemente abgeleitet und prognostiziert werden kann.

Kontingenz beschreibt eine System- und Umfeldsystemstruktur an Möglichkeiten. Etwas ist oder auch nicht. Auf der Handlungsebene sozialer Systeme sind Entscheidungen und Ereignisse betroffen: ergriffene bzw. unterlassene Handlungen und potenzielle Handlungsalternativen bilden den Rahmen für die Selektionsleistung des sozialen Systems. Mit dem Hinweis auf die Kontingenz ist eine Aussage über die Qualität der Selektionsleistung zum Ausdruck gebracht: etwas ist betroffen oder auch nicht.

Die Emergenz ist eine strukturelle Variante der Kontingenz und lässt die Entropie anwachsen. Mit zunehmender Entropie geht die Kontingenz zurück, d.h. der Raum an Handlungsmöglichkeiten für das System wird kleiner!

Nachdem „Systemarten“ (5. Kapitel) und „Komplexität“ (6. Kapitel) im Zusammenhang der Entropie geklärt wurden gilt es jetzt im Folgenden die Relevanz des variierenden Entropieverständnisses für die betriebliche Praxis (Handlungsebene) zu benennen. Ziel ist die grundsätzliche Bewertung exemplarisch ausgewählter Handlungsmöglichkeiten des Betriebes auf Grundlage ihrer entropischen Wirkung.

7. Varianten des Entropieverständnisses und ihre betriebliche Relevanz

Die existierenden Varianten des Entropieverständnisses lassen sich über ihren energetischen Bezug in diverse betriebliche Erfahrungswelten und theoretische Kontexte einordnen (siehe Tabelle 2). Sie beziehen sich sowohl auf die physikalische, als auch auf die soziale Systembasis. Ideell sind die meisten Varianten des Entropieverständnisses direkt auf den prozessualen Kern des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik rückführbar.⁵⁵ Allerdings eine Variante des Entropieverständnisses (in der Tabelle 2 die Nr. 7) unterscheidet sich von den übrigen, da sie wegen ihrer subjektiv-relativistischen Qualität kritisierbar ist (siehe unten die Kritik von Karl Popper).

⁵⁵ Die Beleggrundlage für die vorgenommenen Kategorisierungen und Einschätzungen ist folgendes Zitat: „Entropie (...Innenwendung) heißt jener Teil der Energie, die nicht mehr in mechanische Energie, in Arbeit umsetzbar ist, also die entwertete, ausgeglichene, zerstreute Energie. Es kann nach Carnot Wärme nur dann in Arbeit verwandelt werden, wenn sie von wärmeren zu kälteren Körpern übergeht, und nach Clausius kann Wärme nicht von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen. Die Umsetzung der Energien ineinander hat nun die Richtung, daß immer mehr Intensitätsdifferenzen kompensiert werden, immer mehr Arbeit in Wärme sich verwandelt, die nicht umgekehrt, wieder zur Arbeit werden kann, sondern sich immer mehr ausgleicht und zerstreut, bis schließlich alle Energie entwertet ist, keine Arbeit mehr geleistet wird, alles im unveränderlichen Gleichgewicht bleibt („Wärmetod“, „Maximum der Entropie“). Der Satz von der beständigen Zunahme der Entropie, der nicht mehr nutzbaren, arbeitsfähigen Energie kann auf das Weltganze nur angewandt werden, wenn die Unendlichkeit der Zeit und des Rauminhaltes nicht berücksichtigt wird.“ Eisler (1913), S. 175. Der im Text genannte Bezug auf Carnot führt zurück auf: Carnot, Nicolas Léonard Sadi (1824), *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Paris

Tabelle 2: Varianten des Entropieverständnisses und ihr betrieblicher Bezug

Varianten des Entropieverständnisses: Beschreibungsgrößen zum Systemzustand	Höhe der Entropie	Betriebliche Relevanz und Wahrnehmung d. Entropie in exemplarischen Feldern
(1) Richtung der Energieumwandlung: Wärme geht gesetzmäßig vom wärmeren zum kälteren Körper (2.HS Thermodynamik)	Steigend	Stoffphysikalische Grenzen des Machbaren; festgelegte Richtung
(2) Grad der Umkehrbarkeit/Umwandlung im Sinne des Verlassens einer Ordnung im Übergang zu einer anderen Ordnung (Prozessrichtung): Prinzip der... a) Irreversibilität b) Reversibilität	Niedrig bis hoch Hoch Niedrig	Zwangsläufigkeit, Veränderbarkeit von Prozessen bzw. Entscheidungen Unumkehrbarkeit Umkehrbarkeit
(3) Zustandswahrscheinlichkeit der Ordnung („Ordnung“ im Sinne von Festgelegtheit, nicht im Sinne von Sauberkeit)	Steigend	Bewegung bzw. Prozess zu einer bestimmten Ordnung
(4) Umfang der Nutzbarkeit von Energie a) bei arbeitsfähiger, nutzbarer Energie b) bei nicht verfügbarer Energie, Energieverlust	Niedrig bis hoch Niedrig Hoch	Wertschöpfender Produktionsfaktor Verhinderte Wertschöpfung, Ineffizienz
(5) Umfang nutzbarer Differenzen (Unterschiede)	Niedrig bis hoch	Betrieblicher Entscheidungsspielraum bei der Realisierung von Handlungen (z.B. Qualitäts- oder Kostenorientierung, kurzfristige oder langfristige Entscheidung)
(6) Grad an Umweltzerstörung	Niedrig bis hoch	Bedrohung der Existenzgrundlage, ungenutzte Chancen bzw. Potenziale
(7) Maß des Informationsmangels / der Unwissenheit über den Mikrozustand des Systems, bei gleichbleibendem Makrozustand des Systems, steigt [mit Zunahme der Entropie].	Niedrig bis hoch	Fehlergründe, unbekannte Handlungsweisen, Alternativen, „Zufälligkeiten“

Zusammengefasst greift Tabelle 2 folgende theoretische Varianten des Entropieverständnisses auf:

1. Entropie steht für entwertete, zerstreute, also nicht mehr nutzbare Energie.
2. Wärme (nach Carnot) lässt sich nur in Arbeit verwandeln, wenn sie vom wärmeren Körper/System auf den kälteren Körper bzw. kälteres System übergeht (Beispiel des geöffneten Eisschranks: die Raumwärme geht in den Eisschrank hinein). Zum Betrieb der Kühlaggregate, d.h. zum Entropieabbau des Eisschranks muss durch die Systemoffenheit zusätzliche Energie, d.h. konkret Strom von außen zugeführt werden; diese Systemöffnung ist nicht mit der Öffnung der Eisschrantür zu verwechseln.

3. Der Fall, dass die Restwärme aus der Kälte des Eisschranks in die Wärme des Zimmers geht, d.h. (Rest-)Wärme geht aus dem Kälteren auf das Wärmere, ist ohne Energieaufwendung von außen, nicht möglich.
4. Die Grenze nutzbarer Energiedifferenzen, also arbeitsfähiger Energie, stellt sich dort ein, wo eine endgültige Umfeldsystemgrenze erreicht ist. Wo diese Grenze konkret liegt ist wissenschaftlich bis heute umstritten. Kein Wissenschaftler kann das „Maximum der Entropie“ und damit die Grenzen des Universums bestimmen.

Die betriebswirtschaftlich relevante Systemgrenze ist nach heutigem Stand die Erde. Eine Erschließung des Weltalls für wirtschaftliche Nutzungen ist in weiten Teilen noch Utopie, von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen, wie kommerzielle Weltraumflüge für Privatpersonen. Nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik und realwirtschaftlichen Erfahrungen sind viele natürliche Ressourcen endlich. Ressourcenbezogen übersetzt, steht Entropie für das Maß an Umweltverbrauch. Ohne eine Systemöffnung über die Erde hinaus sind betriebliche Handlungen daher von steigender Entropie bedroht.

Betriebswirtschaftlich/ökonomische Konstrukte, wie beispielsweise Produktivitätskennziffern, die beim Steuerungsanspruch auf Betriebe zum Einsatz kommen, bringen die thermodynamische Energieumwandlungsqualität nur unzureichend zum Ausdruck. Mit den Worten Rifkins wird die unzureichende Abbildung der Energielage in den gängigen Steuerungsgrößen deutlich:

„In den Begriffen thermodynamischer Effizienz ist also Produktivität ein Maß der pro Outputeinheit produzierten Entropie, nicht der Geschwindigkeit pro Outputeinheit.[...] Solange daher Produktivität in Begriffen wie Geschwindigkeit pro Outputeinheit gemessen wird, solange wird zur Umwandlung von Rohstoffen in wirtschaftlich nützliche Produkte mehr Energie als notwendig verbraucht, und dieser erhöhte Energiedurchfluß wird in größerer Unordnung oder Entropie resultieren, wofür die Gesellschaft letzten Endes zahlen muß.“⁵⁶

Die Richtungsgebundenheit der Energieumwandlung (vom Wärmeren zum Kälteren) und die Begrenztheit der Energieumwandlungsmöglichkeit thermodynamischer Prozesse stellen zentrale Botschaften für Betriebe als Systeme dar (siehe unten Kapitel 9). Der siebte Punkt „Informationsmangel/Unwissenheit“ der Tabelle 2 „Varianten des Entropieverständnisses“ ist wegen seiner, wie bereits erwähnt, subjektiv-relativistischen Qualität durchaus kritisierbar, aber aufgrund seines realwirtschaftlichen Bezugs für die Kommunikation im sozialen System, unabdingbar. Bereits im 4. Kapitel wurde die grundsätzliche Relevanz und methodische Nützlichkeit

⁵⁶ Rifkin (1982), S. 147

der „Information“ für die Systemperspektive herausgestellt. Die Argumentation des 8. Kapitel reflektiert die Bedeutung der Informationsbehandlung für soziale Systeme.

Die Betroffenheit der Betriebe durch Entropie ist, wie gezeigt, vielschichtig. Wie physische und soziale Systemzugehörigkeit, aber auch die Beobachterposition von außen miteinander verbunden werden kann zeigt die Rezeptionsgeschichte der Entropie aus Perspektive von Literatur, Literaturwissenschaft und Historiographie. Die Kombination aus komplexen dynamischen Ordnungsstrukturen, hinreichenden Informationsmengen zur Beschreibung einer Situation und Formen des Energietransfers ist dort in diversen Systembeschreibungen abgebildet.

In einer exemplarischen Textpassage von Johannes Willms zur Schlacht von Waterloo sind unterschiedliche Entropievarianten erkennbar; es handelt sich um die Betonung des Umwandlungsgrades, des Informationsmangels, des Zerstörungsmaßes und des Energieverlustes:

„Eine Schlacht, bei der über einhunderttausend bewaffnete, von verständlicher Angst oder auch Begeisterung aufgepeitschte Männer in unterschiedlichen Angriffswellen auf einer für diese Masse sehr kleinen Fläche von lediglich rund sechs Quadratkilometern aufeinandertreffen, entfaltet ein Geschehen, das sich in seiner Totalität nicht präzise in allen Einzelheiten überschauen lässt. Zu rasch wechselt die Szenerie, folgt auf den Vorstoß der Zusammenprall, steigert sich der Gefechtslärm, das Schreien der Soldaten, das Wiehern der Pferde, die Klagerufe der Verwundeten, das Klirren von Metall, das Musketen- und Geschützfeuer zur ohrenbetäubenden Kakophonie der Schlacht. In diesem infernalischen Chaos hat das Auge nicht die Muße oder die desinvolture á la Ernst Jünger, also der Gelassenheit des unbeteiligten Zuschauers. Der einzelne, der im Mahlstrom einer Schlacht steht, wird nur den Ausschnitt des Geschehens gewahren, von dem er unmittelbar Leib und Leben bedroht sieht, und er wird vornehmlich Eindrücke aufnehmen, die seine Überlebensreflexe steuern. Außerdem ist eine Schlacht, in der Menschenmassen, hoch zu Ross oder zu Fuß in dichte Kolonnen oder in Karrees zusammengedrängt, aufeinanderschlagen, sich auf kürzeste Distanz mit Hieb-, Stich- und Feuerwaffen nach dem Leben trachten, etwas ganz anders als die Summe von Einzelkämpfen, Scharmützeln, Gefechten und bravourösen Taten; eine solche Schlacht auf so engem Raum stiftet eine Entropie, von der die sinnliche Wahrnehmung schlicht überfordert wird, wie die wohl berühmteste Schilderung des Geschehens vom 18.Juni 1815 in Waterloo zeigt, die Stendhal in der Kartause von Parma gegeben hat.“⁵⁷

⁵⁷ Willms (2015), S. 211f.

Nicht nur auf ein Schlachtenszenario, sondern auch auf andere Formen geballter Anhäufungen von Aktivitäten treffen die genannten Interpretationen der Entropie (siehe Tabelle 2) alle gleichermaßen zu. Gegenstände, Tiere, Transportmittel und Personen sind mehr oder weniger „unbeschadet“ in ihrer Möglichkeit. Der Informationsmangel für den internen Beobachter (Akteur), aber auch für den externen Beobachter (Autor, Leser) liegt in der Art der Verteilung, Dekonstruktion und Unordnung der Umwandlung der Energie begründet. Und auch der Zusammenhang der Entropie als Zerstörungsmaß ist unmittelbar naheliegend. Ganz besonders der Prozess des Energieverlustes über die Zustandsformen Erschöpfung, Sterben und Tod lässt sich als Form der Entropiezunahme begreifen.

Die bereits erwähnte Kritik Poppers an der informationstheoretischen Bezugsbasis der Entropie (siehe 6. Kapitel) ist Gegenstand der Überlegungen im folgenden Kapitel. Nach Einschätzung des Beitrags lässt die informationstheoretische Bezugsbasis von Betrieben als sozialer Systemart einen Bezug zur Entropie in informationstheoretischer Interpretation direkt zu.

8. Kritik an der „Subjektivistischen Theorie“ der Entropie

Das Entropieverständnis der sogenannten „subjektivistischen Theorie der Entropie“ ist an die Informationsmenge über ein System gekoppelt.⁵⁸ Der beobachtende Analytiker eines Systems benötigt Informationen, um seine Unterscheidungen treffen zu können. Wenn in diesem Kontext die Entropie steigt heißt das, dass die vorhandene Information über ein System abnimmt, fällt die Entropie, nimmt die Information über das System zu.

Die relativistische Position des beobachtenden Individuums im Verständnis der Entropie veranlasst Popper zu heftiger Kritik, die er in polemisch zu nennender Weise zum Ausdruck bringt:

„Das Gebäude, das auf Szilards (nach meiner Meinung ungültigem) Argument und auf ähnlichen Argumenten anderer aufgebaut wurde, wird, so fürchte ich, weiterhin wachsen; und wir werden weiterhin hören, daß „die Entropie – wie die Wahrscheinlichkeit – das Fehlen von Information mißt“ und daß Maschinen, wie Szilards Maschine, durch Wissen angetrieben werden können. Heiße Luft (hot air = Geschwätz) und Entropie werden, fürchte ich, auch weiterhin produziert

⁵⁸ Die subjektivistische Theorie der Entropie ist eine „Theorie, die ursprünglich auf Leo Szilard zurückgeht, der zufolge die Entropie eines Systems immer dann zunimmt, wenn unsere Information über dieses System abnimmt und umgekehrt.“ Popper (1984), S. 237, Szilard (1925), S. 753-788, Szilard (1929), S. 840-856

werden, solange es noch Subjektivisten gibt, die bereit sind, einen äquivalenten Betrag von fehlender Information zur Verfügung zu stellen.“⁵⁹

Popper bezweifelt die Gültigkeit der Gleichungen „Information = Negentropie; Entropie = fehlende Information = Nichtwissen“⁶⁰, eben weil sie subjektivistischer Natur sind. Karl Popper lehnt das „subjektivistische Entropieverständnis“ kategorisch ab.⁶¹

Von einem Standpunkt der Physik aus betrachtet, der das Entropiekonstrukt auf die naturphysikalisch thermodynamisch materiellen Prozesse begrenzt, ist Poppers Standpunkt nachvollziehbar. Von einem erkenntnistheoretischen methodischen Standpunkt aus betrachtet, lässt sich aber auch die gegenteilige Position argumentativ behaupten, wenn soziale Systeme die Bezugsbasis bilden. Gerade in der sozialen Systemtheorie spielen „Informationen“ hinsichtlich der Konstituierung sozialer Systeme, eine zentrale Rolle.

Die Skepsis gegenüber „Informationen“ als Entropiemessmaß lässt sich reduzieren, wenn Informationen nicht über den Quantitäts-, sondern den Qualitätsaspekt betrachtet werden.

In der Kommunikations-/Informationstheorie der Informatik richtet sich der Informationsgehalt von Nachrichten danach, wie häufig „Zeichen“ auftreten. Die Datensätze bilden die Basis für den inhaltlichen Bezug. Die Entropie im informatorischen Kontext ist „durch den Mittelwert der mit den Auftretenswahrscheinlichkeiten gewichteten Informationsgehalten der Zeichen gegeben.“⁶² Der Hinweis auf die statistische Wahrscheinlichkeit zeigt prinzipielle Parallelitäten zur Auftretenswahrscheinlichkeit der Wandlungsrichtung von Energie (siehe Boltzmann und der 2.HS).⁶³ Bei Vergleich zweier Zustände der Informiertheit enthält der Zustand mit der niedrigeren Entropie einen größere Prognosesicherheit über den Eintritt eines bestimmten Zeichens.⁶⁴ Die maximale Entropie spiegelt einen Zustand, analog zum Wärmetod des All wieder, „wenn alle Zeichen mit gleicher Häufigkeit auftreten“.⁶⁵

Information ist etwas, was ich suche, aber nicht habe, damit ist es ungleich Wissen und ein Maß für den Umfang des Unbekannten. So lässt es sich aus den nachstehenden Aussagen zur Experimentalphysik ableiten:

⁵⁹ Popper (1984), S. 242

⁶⁰ Popper (1984), S. 237

⁶¹ „... der zufolge die Entropie eines Systems immer dann zunimmt, wenn unsere Information über dieses System abnimmt und umgekehrt.“ Popper (1984), S. 237, vgl. Popper (1984), S. 222, 237ff

⁶² Ernst et al. (2016), S. 62

⁶³ Vgl. Ernst et al. (2016), S. 62

⁶⁴ Vgl. Ernst et al. (2016), S. 63

⁶⁵ Ernst et al. (2016), S: 70

„Information kann mit einer der drei folgenden Formulierungen definiert werden:

- Information ist das, was wir nicht wissen.
- Information ist die Eigenschaft einer Nachricht, beim Empfänger Kenntnisszuwachs zu erzeugen.
- Information ist Wissenszuwachs und damit Abbau von Unsicherheit über einen interessierenden Sachverhalt.

Information hat also etwas mit Unbekanntem oder Unerwartetem zu tun. Alles, was wir bereits wissen, enthält keine Information. Nur der Aspekt des Unbekannten ist wichtig, nicht die ‚Inhaltsschwere‘ oder Bedeutsamkeit der Nachricht....⁶⁶

Entropie entspricht dem mittleren Informationsgehalt je Zeichen: „die Entropie gibt an, wie viele Binärzeichen man bei der binären Codierung von Nachrichten für die einzelnen Zeichen wenigstens aufwenden muss.[...] die Entropie eines Versuches mit den möglichen Ausprägungen x_i ist am größten, wenn alle Ausgänge gleich wahrscheinlich sind.“⁶⁷

Bei der Systembeobachtung ist die subjektivistische Basis des Systembeobachters kein methodisches Problem, sondern eine zentrale Voraussetzung für den individuellen Entscheider, der in seiner spezifischen Beobachtung einen Unterschied/Grenze (z.B. zwischen Innen und Außen [System und Umfeldsystem] oder Geschlossenheit und Offenheit, vollzieht.

Die energetische Kraft sozialer Systeme ist die Kommunikation, bestehend aus „Mitteilung“, „Verständnis“ und „Information“.⁶⁸ Ohne Information kein Verständnis bzw. Unverständnis und Mitteilung und damit letztlich auch kein „soziales System“. Als zentrale konstituierende Komponente sozialer Systeme ist „Information“ im Kontext der Mitteilung flankiert durch diverse Energiearten (wie beispielsweise die kinetische).

Da in sozialen Systemen und bei der Beobachtung derselben auch von außerhalb dem Beobachter eine herausragende Rolle zukommt, ist aus sozialwissenschaftlicher Perspektive die Frage der Informationsmenge und –qualität aus individueller, subjektiver Sicht bedeutsam. Sobald es um die Konstituierung sozialer Systeme durch Kommunikation geht, ist für einen „Beobachter“ der im sozialen oder über das soziale System entscheidet, d.h. „unterscheidet“, die kürzeste hinreichende Beschreibungslänge des bezeichneten Objekts/Sachverhalts ein wichtiger

⁶⁶ Kallenrode (2005), S. 305

⁶⁷ Kallenrode (2005), S. 309

⁶⁸ Vgl. Luhmann (2009a), S. 280, 293

Orientierungsmaßstab.⁶⁹ Bei einem Bezug der Systemanalyse auf soziale Systeme hat die Informationslage immer eine energetische Funktion für das Soziale.

Der Beitrag hat bislang die Bedeutung der Entropie für betriebliche Systeme über folgende Stufen begründet:

1. Inhaltliche Klärung der Entropie.
2. Darstellung der Konsequenzen der Entropie für die Handlungsebene (Handlungsmöglichkeit) im System.
3. Das spiegelbildliche Verhältnis von Entropie und Negentropie belegt, dass die Handlungsmöglichkeit des Systems durch die Hereinnahme nutzbarer Energie von außen, auf Kosten des Umfeldsystems ermöglicht wird.
4. Die Existenz unterschiedlicher Systemarten zeigt, dass die physische Systemsphäre in der Analyse realer Betriebe eine vielschichtige strukturelle Ausgangsbasis für Entropie bildet.
5. Die Intensität der Wechselwirkung von Systemkomplexität und Entropie (Entropie als Ursache und Wirkung von Komplexität) steigert sich mit der Betriebsgröße.
6. Ein betrieblicher Bezug zu den Varianten des Entropieverständnisses lässt sich argumentativ erbringen.
7. Die zentrale Rolle der „Information“ für soziale Systeme, aber auch für deren Analyse durch externe Beobachter, ist begründet und ohne informatorische Ebene im Entropieverständnis ist ein soziales System Betrieb entropisch nicht bewertbar, was ein Widerspruch wäre, denn ein produktives System Betrieb setzt durch „Entscheidungen“ einen Bezug zum Betrieb als soziales System zwingend voraus.

Entscheidungen und Handlungen sind Bestandteile des sozialen Systems. Es gilt jetzt als letzter Schritt der Untersuchung einige betriebliche Themen, die in das soziale System Betrieb eingebettet sind, exemplarisch in ihrer Wirkung auf die Entropie, aufzuführen, damit die entropische Wirkung betrieblichen Handelns im sozialen System Betrieb fassbar wird.

9. Die entropische Wirkungsweise betriebswirtschaftlicher Zustandsqualitäten

Den Zustandsqualitäten des betrieblichen Systemseins lassen sich Entropierichtungen zuordnen, wie die folgenden Ausführungen zeigen.

⁶⁹ Vgl. Luhmann (2009a), S. 334

Die Überlegung geht aus vom Anfangs- und Endzustand der Entropiehöhe des Systems im Zusammenhang mit einer Maßnahme (d.h. einer Handlung/Tätigkeit/Entscheidung), einem Zustand oder Prinzip. Der Weg vom Anfang bis zum Endzustand i.S. einer thermodynamischen Verbrauchsfunktion, also der operative situative Ablauf der einzelnen Maßnahmen interessiert, aufgrund des Charakters der Entropie als Zustandsfunktion, dabei nicht. Wichtig ist, dass am Ende des betrieblichen Entscheidungsprozesses die summarische Wirkung der betreffenden Maßnahmen auf die Entropielage feststellbar ist. Der Ressourceneinsatz ist davon immer unmittelbar oder mittelbar betroffen.

Die Frage, ob beispielsweise die Ordnungsmuster schaffende Handlung „Regulierung“ die Entropie eines Unternehmens erhöht oder reduziert, betrifft unmittelbar die Qualität des betrieblichen Ressourceneinsatzes. Menschliche Entscheidungen und Institutionen haben aufgrund ihrer energetischen Natur immer einen Bezug zur Entropie. Mit jeder betrieblichen (Einzel-) „Entscheidung“ bzw. Handlung nimmt die Entropie im Unternehmen zu, weil zunächst die Grundmenge nutzbarer Differenzen kleiner wird. Wenn aber in der Folge weniger Korrekturentscheidungen anstehen, weil die ursprüngliche Entscheidung im Sinne des Systemerhalts passend war, bedeutet das eine Abnahme der Entropie des gesamten Handlungsraumes des Betriebs. Eine saldierte Betrachtungsweise ist folglich notwendig, wenn es um die Abschätzung der entropischen Wirkungen betrieblicher Entscheidungen geht.

Eine hohe Entropie bedeutet immer ein Mangel an Energie und Informationen, eine Festlegung, Strukturgebundenheit und Irreversibilität von bestimmten Handlungen, die andere Handlungen ausschließt – eine niedrige Entropie weist hin auf Entscheidungs-, Handlungs- und Gestaltungsfreiheit auf Basis von hinreichenden Energie- und Informationsmengen.

Jede Form der Nutzung, Verarbeitung, Veredelung und Wiederaufbereitung materieller Ressourcen in der Ressourcenallokation ist mit zunehmender Entropie verbunden. Dieser thermodynamische Grundzusammenhang gilt für den Umgang mit immateriellen Ressourcen nur eingeschränkt. „Fähigkeiten“ als eine Form betrieblicher Ressourcen, die zum Zustand der „Informiertheit“ oder „eines Perspektivenwechsels“ führen, haben sinkende Entropie zur Folge.

Nachfolgend sind einige exemplarische Zustandsqualitäten des betrieblichen Seins herausgegriffen, für die im Einzelnen argumentativ der Nachweis der Entropierelevanz aus einer systembezogenen, d.h. systemtheoretischen und thermodynamischen Perspektive heraus, geführt wird:

„Regelungen der Bürokratie“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Regelungen sind institutionell gesetzte Standards, Verhaltensrichtlinien, Arbeitsanweisungen usw. Aus systemtheoretischer Perspektive i.S. von Luhmann entspricht der vorausgehende

Vorgang der Regulierung einer Selektion von Relationen, die das System als überlebenswichtig für den Systemerhalt ansieht. Der Vorgang der Regulierung verringert durch Setzung von Standards bewusst den Informationsbedarf in Einzelfallentscheidungen. Zielsetzung ist vordergründig die Komplexitätsbewältigung, aber Regulierung schafft wiederum selbst eine neue Form der Komplexität, die durch Informationsmangel in Bezug auf Einzelfälle, Anpassungs- und Veränderungsmöglichkeiten des Systems Unternehmen, bedingt ist. Institutionelle Verbote und Vorgaben verhindern zum einen bestimmte Möglichkeiten und zum anderen schaffen sie durch Entlastung (Ressourcenschonung) gerade neue Möglichkeiten an anderer Stelle.

Ein Beispiel für den Wechsel von zuerst weniger (Regel: Für Produktauskünfte ist nur der Kundenberater zuständig), dann wieder Anstieg der Komplexität (Innerbetriebliche Suche nach dem Kollegen) durch Regulierung ist beispielsweise die Einhaltung des Dienstwegs via „Zuständigkeitsregeln“; ein Kunde ruft wegen technischer Fragen zum gekauften Produkt einen dafür zuständigen Mitarbeiter des Herstellerwerkes an, dieser vermittelt weiter bis der zuständige Mitarbeiter gefunden ist, der für Auskunft an Externe zuständig ist.

Kurzfristig fällt die Entropie des Systems durch den Informationszufluss, da dieser zur Vermeidung von Suchentscheidungen beiträgt, mittelfristig steigt die Entropie wieder, denn Kreativität und Freiräume sind durch den Aufwand der Aktenokumentation, bedroht. Zunehmende Systemkomplexität bedeutet höhere Entropie für das System. Und höhere Entropie wiederum verursacht höhere Systemkomplexität. Entropie ist Ursache und Wirkung der Komplexität zugleich. Auch die Zunahme an Umfeldkomplexität erhöht die Entropie für das System, da es die höhere Umfeldkomplexität „bewältigen“ muss (siehe Luhmann zu Selektion und Kommunikation als selektives Geschehen).⁷⁰

Die schriftliche Erfassung und Dokumentation eines Entscheidungsvorgangs ist ein wesentliches Element der öffentlichen und privaten Verwaltung (Bürokratie). Eine Entscheidung nach Aktenlage ermöglicht die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung zu jedem späteren Zeitpunkt. Diesen Vorzug der bürokratischen gegenüber einer willkürlichen Entscheidungsfindung hat Max Weber hinreichend herausgestellt.⁷¹ In einer arbeitsteiligen Verwaltung vereinfacht die Nachvollziehbarkeit einer Entscheidung die Einleitung geeigneter Maßnahmen. Regelungen der Bürokratie verringern insgesamt in saldierter Betrachtung die Entropie.

Bei zunehmenden Regelungen, d.h. bei wachsender, nicht überzeugend begründeter Ausweitung der „Aktenlage“ in einer ineffizient organisierten, arbeitsteiligen Verwaltung tritt eine Ressourcenverschwendung (an Zeit, Kreativität, Geld usw.) ein. Die Entropie im System steigt.

⁷⁰ Vgl. Luhmann (1984), S. 194f., 203f.

⁷¹ Vgl. Weber (1921/22), S. 224-227

„Markt- und Kundennähe“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Der Zustand einer besseren Informiertheit über Entwicklungen, Wünsche und Bedürfnisse der Nachfrageseite im Markt ist nur ein Aspekt der Markt- und Kundennähe. Ebenso wichtig ist die darin zum Ausdruck kommende Bereitschaft sich auf die anderen Wirtschaftsakteure (weiterverarbeitende Unternehmen, nachgelagerte Wertschöpfungspartner, Endkunden etc.) flexibel einzustellen. Desinteresse bzw. Missachtung der Kundenpräferenz und eine Distanz zu aktuellen Marktentwicklungen belegen eine Markt- und Kundenferne. Der betriebliche Ressourcenbestand wird durch die Vermeidung von Fehlentscheidungen geschont. Das Unternehmen sichert über die Markt- und Kundennähe zu seinem Umfeldsystem „Branche“ sein Überleben als System. Die Entropie im Unternehmen nimmt ab!

Eine zu intensive Markt- und Kundennähe, die eine Anbindung des Anbieters an die überhastete Wechselhaftigkeit der Kundenpräferenzen bedeutet, ist für die Disposition und Leistungsfähigkeit des Herstellers von Nachteil: eine immer höhere Produktleistungsfähigkeit zu relativ geringen Preisen, bei zunehmenden Produkttypen und –variantenwechsel, in kürzeren Marktzyklen, in einem wettbewerbsintensiven dynamischen Käufermarkt führt zu einer Auszehrung des betrieblichen Wertschöpfungspotenzials. Wann letztlich für den Betrieb der „kritische Punkt“ zwischen Kundennähe und Kundendistanz erreicht ist, lässt sich nur betriebsspezifisch annäherungsweise abschätzen.

Die Entropie im Unternehmen steigt im Falle eines übertriebenen Maßes an Markt- und Kundennähe, weil die Umfeldkomplexität des Marktes bzw. der Branche durch das Unternehmen nicht mehr bewältigt wird.

„Informiertheit“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieänderung: Informiertheit ist der Zustand einer für den Entscheidungsträger hinreichend zur Verfügung stehenden Informationsmenge und –qualität. Hinreichend heißt, es liegt eine Informationslage vor, die die begrenzte Rationalität eines informationsverarbeitenden Systems nicht überfordert und für den Bezugspunkt angemessen ist. Ein zu wenig an qualitativer Information lässt die Entropie steigen, ein hinreichendes Maß bewirkt die Abnahme der Entropie im Unternehmen.

Ein Zuviel an Informationen (Zustand der Überinformiertheit) verschlechtert die Entscheidungsqualität. Bekannt ist das Informationsparadox, nach dem die Informationsverarbeitung umso komplexer ist, je mehr Informationen vorliegen.⁷² In einem derartigen Fall nimmt die Entropie für das System zu.

⁷² Vgl. Neuberger (2002), S. 362 ff

„Pluralität und Perspektivenwechsel“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Sowohl die pluralistische Perspektive, nach der die Welt aus vielen selbständigen Prinzipien besteht, als auch die ontologische Existenz einer Vielfalt von Dingen, also die Wahrnehmung und das Seiende der Vielfalt – beides vergrößert strukturell nutzbare Differenzen im System. Eine pluralistische Position und Existenz ist damit Ausdruck niedriger Entropie.

Jede Beobachtung des System Unternehmen ist eine systemrelevante Entscheidung, die das Innen und Außen einer Unterscheidung kennzeichnet.⁷³ Der Perspektivenwechsel setzt bei der „Beobachterposition“ des Entscheidungsträgers an, der aus verschiedenen Blickwinkeln heraus, beobachtet. Der Perspektivenwechsel trägt dazu bei, die Kenntnis über einen Mikrozustand zu erhöhen oder anders ausgedrückt ihn in seiner strukturellen Komplexität differenziert zu sehen. Der Informationsstand über den Zustand nimmt zu.

Die Entropie des Systems als Maß fehlender Informationen nimmt aus Beobachterperspektive ab.

„Redundanz“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Ein mehrfaches, über das notwendige Maß einer Anwendung hinausgehendes, zusätzliches Vorhandensein von Ressourcen der gleichen Art, stellt ein Übermaß an Ressourcen dar; dieser Zustand ist eine Redundanz. Die Erfüllung einer Puffer- bzw. Sicherheitsfunktion, beispielsweise durch einen Materiallagerbestand, steht exemplarisch für eine geplante, d.h. bewusst vorgenommene Redundanz; bei Zerstörung und Abfallentstehung in Bezug auf Ressourcenbestände liegt eine ungeplante Redundanz vor.⁷⁴ Im Falle der geplanten Redundanz vergrößert sich der Raum an Handlungsalternativen für den Betrieb durch die Absicherung vor existenzbedrohenden Ereignissen. Dadurch fällt die Entropie grundsätzlich.

Im Fall der ungeplanten Redundanz reduziert sich der Raum der Handlungsmöglichkeiten für geplante alternative Ressourcenverwendungen eindeutig mit dem Ergebnis des Entropieanstiegs.

Aber auch die geplante Redundanz belegt Ressourcen, die für alternative Verwendungen zunächst nicht mehr in Frage kommen, mit dem Ergebnis eines Entropieanstiegs. Bei geplanter Redundanz ist folglich eine spezifische, saldierende Betrachtung der Entropie notwendig.

⁷³ Vgl. Krcal (2003), S. 9 ff

⁷⁴ Vgl. Krcal (2012), S. 679-717

„Demotivation“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Im Handlungskontext der Betriebsmitarbeiter spielt der Zustand „Demotivation“ als Gegenstück zu Motivation eine große Rolle. Wenn keine Antriebe oder Anreize für Handlungen vorliegen (=Demotivation), erschweren Handlungen das Erreichen der gewünschten betrieblichen Qualität. Im Sinne der sozialen Systemtheorie heißt das, dass Selektion unterbleibt, keine „Relationierung der Relationen“ stattfindet, also notwendige Handlungen für den Systemerhalt nicht stattfinden.⁷⁵

Die Entropie steigt, d.h. die Informationsmenge geht zurück, der Informationsbedarf steigt; die Bewältigung der höheren Umfeldkomplexität durch das System ist nicht mehr systemerhaltend gewährleistet.

„Ignoranz“

Eigenschaft, systemtheoretische Bewertung und Entropieveränderung: Der bewusste oder unbewusste Zustand der Missachtung von Informationen, die bewusste Nichtwahrnehmung, das Nichtbeachten von Offensichtlichem, das Nicht-Wissen Wollen, mit anderen Worten die „Ignoranz“ ist eine im betrieblichen Kontext auf allen Strukturebenen häufig anzutreffende Systemqualität. Das Ergebnis dieses Verhaltens ist ein zunehmender Informationsmangel über die tatsächliche Vielschichtigkeit der Wirklichkeit. Die Nichtbeachtung der thermodynamisch relevanten Formen der Kraftumwandlung und ihrer Formen, wie Arbeit, Information, Energie und Materie führt zu einem Mangel an beobachtbaren und damit nutzbaren (Energie-)differenzen. Die Entropie des Systems „Unternehmen“ steigt.

Die „Zustandsqualitäten des betrieblichen Seins“ lassen in der systemtheoretischen Reflektion einen argumentativ eindeutigen Bezug zur Entropie zu. Systemtheoretische Bestandteile, wie die Selektion von Relationen, Informationsbedarf und –mangel, Komplexitätsbewältigung, Reversibilität, die Vielfalt strukturell nutzbarer Prinzipien, Beobachtung, Handlungsmöglichkeit, und Anreize für Handlungen unterstreichen, wie die Seinsqualität des Systems entropisch wirkt.⁷⁶ Der Akteur im Betrieb (Mitarbeiter, Führungskraft usw.) ist mit seinen Beobachtungen in Bezug darauf, was und wie das System ist, seinen Entscheidungen und seiner materiellen Wirkungsmächtigkeit für das System essentiell prägewirksam. Jede Beobachtung ist eine aktive Entscheidung des reflektierenden Systems, die Kraft aufwendet und festlegt.

⁷⁵ Vgl. Luhmann (2009b), S. 13

⁷⁶ Vgl. Krcal (2003), S. 3-30

10. Fazit

Der Beitrag begründet die Bedeutung und das Verständnis der „Entropie“ mit ihrem Systembezug und diverse Systemarten für das betriebliche System.

Über die thematischen Stationen einer Klärung der thermodynamischen Herkunft der Entropie, des Bezugs zu „Handlungen“, der Analyse von Negentropie für die Bedeutung des Systemüberlebens, der Klärung der Rolle der Entropie bei der Bildung von Systemkomplexität und der Darstellung der Varianten des Entropieverständnisses in Nähe zur betrieblichen Wirklichkeit (siehe Tabelle 2), vollzog sich die Auseinandersetzung mit der Entropie.

Eine Variante des Entropieverständnisses ist der „Informationsmangel“ in der Beobachtung und Analyse über das Wesen des Systems; für das Verständnis sozialer Systeme ist das eine wichtige Größe.

Zustandsqualitäten des betrieblichen Seins, darunter sind strukturelle, d.h. „Regeln“ und „Ressourcen“ betreffende Themenvorgänge zu verstehen, sind im Betriebsalltag allgegenwärtig. Die argumentative Hervorhebung einiger exemplarischer Zustände, d.h. statischer Momentausschnitte, die in der Realität zu beobachten sind und in der Literatur häufig Erwähnung finden, wie „Regelungen der Bürokratie“, „Markt- und Kundennähe“, „Informiertheit“, „Pluralität und Perspektivenwechsel“, „Redundanz“, „Demotivation“ und „Ignoranz“, zeigt, wie sie eine entropische Wirkung entfalten. Handlungsmöglichkeiten des gesamten Systemraums sind von den Wirkungen betroffen; es kommt zur Reduktion der Handlungsmöglichkeiten im System, wenn die Systementropie steigt und zu mehr Handlungsoptionen, wenn die Entropie sinkt. Eine betriebliche Entscheidungsfindung, die der entropischen Wirkungen der Betriebshandlungen bewusst ist, wägt deshalb „Regeln“ und „Ressourcen“ betreffende Entscheidungen sorgfältig ab. Die Qualität der Entscheidungsprozesse bedingt die zukünftigen Handlungsoptionen für das System Betrieb; das mit entsprechender Wirkungsanalyse seine Handlungsoptionen länger behält.

Der Zustand eines thermodynamischen Gleichgewichts, der maximalen Festgelegtheit und Gebundenheit, darf nicht eintreten, da sonst ein Umgang mit knappen Ressourcen nicht mehr möglich und die betriebliche Kraft erloschen ist.

Literaturverzeichnis

- Althaus, Dirk (2009), Nachhaltigkeit, Berlin
- Binswanger, Mathias (1994), Das Entropiegesetz als Grundlage einer ökologischen Ökonomie, in: Zwischen Entropie und Selbstorganisation, Perspektiven einer ökologischen Ökonomie, Beckenbach, F./Diefenbacher, H. (Hrsg.), Marburg, S. 155-200
- Bliss, Christoph (2000), Management von Komplexität, Diss., Wiesbaden
- Bossel, Hartmut (1990), Umweltwissen, Berlin
- Carnot, Nicolas Léonard Sadi (1824), Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propes à développer cette puissance, Paris
- Clausius, Rudolf (1876), Die mechanische Wärmetheorie, 2.A., Braunschweig
- Clausius, Rudolf (1867), Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, Braunschweig
- Clausius, Rudolf (1865), Ueber [sic!] verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie, vorgetragen in der naturforschenden Gesellschaft den 24. April 1865, Vortrag vor der Züricher Naturforschenden Gesellschaft, Vierteljahresschrift der Naturf. Ges., Zürich, 10 Jhg, H.1, S. 1-59
- Clausius, Rudolf (1850a), Über die bewegende Kraft der Wärme, Leipzig, verlegt 1898
- Clausius, Rudolf (1850b), Analen der Physik, Vol. 155, S. 368-397
- Clausius, Rudolf (o.J.), Über die Zurückführung des 2. Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf allgemeine mechanische Prinzipien, vorgetragen in der Niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde am 7. November 1870, Sonderdruck o.O., o.J.
- Eisler, Rudolf (1913), Handwörterbuch der Philosophie, Berlin
- Ernst, Hartmut/Schmidt, Jochen/Beneken, Gerd (2016), Grundkurs Informatik, 6.A., Wiesbaden
- Faber, Malte/Niemes, Horst/Stephan, Gunter (1983), Entropie, Umweltschutz und Rohstoffverbrauch, Eine naturwissenschaftlich ökonomische Untersuchung, Heidelberg
- Feynman, Richard P./Leighton, Robert B./Sands, Matthew (2007), Mechanik, Strahlung, Wärme, Vorlesungen über Physik, Band I, [Chapter What is energy?] Kap.4.1, 5.A., München
- Feynman, Richard P. (2001) Vorlesungen über Physik, 2. Bd.: Elektromagnetismus und Struktur der Materie, 3.A., München
- Gell-Mann, Murray (1994), Das Quark und der Jaguar. Vom einfachen zum Komplexen. Die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt, München
- Georgescu-Roegen, Nicholas. (1986), The entropy law and the economic process in retrospect, IÖW 5/1987, Berlin
- Giancoli, Douglas C. (2010), Physik, 3. erw.A., München

- Gloy, Karen (2006), Grundlagen der Gegenwartsphilosophie, Paderborn
- Hawking, Stephen W. (1988), Eine kurze Geschichte der Zeit, Die Suche nach der Urkraft des Universums, Hamburg
- Kallenrode, May-Britt (2005), Rechenmethoden der Physik, Mathematischer Begleiter zur Experimentalphysik, 2.A., Berlin
- Knizia, Klaus (1986), Die Bedeutung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik für das menschliche Leben, in: BWK (Brennst.-Wärme-KraftBrennstoff), Bd. 38 (1986), Nr. 6, Juni, S. 249-253
- Krcal, Hans-Christian (2012), Eine neue konzeptionelle Perspektive auf Arten des Organizational Slack, in: zfbf, Jg. 64, September, S. 679-717
- Krcal, Hans-Christian (2003), Systemtheoretischer Metaansatz für den Umgang mit Komplexität und Nachhaltigkeit, in: Leisten, R./Krcal. H.-C. (Hrsg.) Nachhaltige Unternehmensführung, S. 3-30, Wiesbaden
- Luhmann, Niklas. (2009a), Einführung in die Systemtheorie, Baecker, Dirk (Hrsg.), 5.A., Heidelberg
- Luhmann, Niklas (2009b), Zur Komplexität von Entscheidungssituationen, in: Soziale Systeme 15(2009), H.1, S. 3-35
- Luhmann, Niklas (2005), Soziologische Aufklärung, Bd. 6.: Die Soziologie und der Mensch, 2. A., Wiesbaden
- Luhmann, Niklas (2002), Einführung in die Systemtheorie, Baecker, Dirk (Hrsg.) 1.A., Heidelberg
- Luhmann, Niklas (1984), Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie, Frankfurt
- Mahnke, Reinhard/Schmelzer, Jörn W.P./Röpke, Gerd (1992), Nicht lineare Phänomene und Selbstorganisation, Stuttgart
- Mainzer (2010), Klaus, Leben als Maschine?: von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz, Paderborn
- Müller, Rainer (2014), Thermodynamik, Göttingen
- Neuberger, Oswald (2002), Führen und führen lassen, Stuttgart
- Ostwald, Wilhelm (1912), Der energetische Imperativ, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, S. 85, zit. bei: Knizia, K. (1986), Die Bedeutung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik für das menschliche Leben, in: BWK (Brennst.-Wärme-KraftBrennstoff), Bd. 38 (1986), Nr. 6, Juni, S. 249-253
- O.V. (2003), Brockhaus Universallexikon, Leipzig
- Parkinson, Cyril Northcote (1997), Das Parkinsonsche Gesetz, 2. A., Düsseldorf
- Planck, Max (1964), Vorlesungen über Thermodynamik, 11.A., Berlin
- Plessner, Helmuth (1975), Die Stufen des Organischen und der Mensch, 3.A., Berlin
- Popper, Karl Raimund/Kreuzer, Franz (1986), Offene Gesellschaft – Offenes Universum, München

- Popper, Karl Raimund (1984), Ausgangspunkte, Meine intellektuelle Entwicklung, 3. A., Hamburg
- Rifkin, Jeremy, (1982), Entropie, ein neues Weltbild, Hamburg
- Ropohl, G. (1979), Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik, München [3.A. Karlsruhe 2009]
- Schrödinger, Erwin (1951), Was ist Leben? - Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet, 2. A., Bern
- Schuster, Stefan/Eils, Roland/Prank, Klaus (2004), 5th International Conference on Systems Biology, Heidelberg, October 9-13, 2004, in: Biosystems. Volume 83, Nr. 2-3, Februar-March 2006, S. 71-74
- Seeliger, Hugo von (1909), Über die Anwendung der Naturgesetze auf das Universum, München
- Segrè, Emilio (1990), Die Grossen Physiker und Ihre Entdeckungen, 2. A., München
- Szilard, Leo (1929) Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, Zeitschrift für Physik, 53(1929), S. 840-856
- Szilard, Leo (1925) Über die Ausdehnung der phänomenologischen Thermodynamik auf die Schwankungserscheinungen, Zeitschrift für Physik, 32(1925), S. 753-788
- Tipler, Paul A./Mosca, Gene (2012), Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 6.A., Berlin
- Trist, Eric/Bamforth, Ken (1951), Some social and psychological consequences of the long wall method of coal getting, Human Relations, 4, pp. 3-38
- Ulrich, Hans (1968), Die Unternehmung als produktives soziales System, Bern
- Wachter, Helmut/Hausen, Arno. (1977), Chemie für Mediziner, 2.A., Berlin
- Weber, Max (1921/22), Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriß der verstehenden Soziologie, III §5 Die bürokratisch-monokratische aktenmäßige Verwaltung, o.J., Paderborn, S. 224-227
- Willms, Johannes, Waterloo, München 2015