

Teilprojekt Systeme

1. Einführung

Als „Systeme“ werden gewöhnlich als Entitäten bestimmt, die aus verschiedenen miteinander zusammen wirkenden Entitäten, den „Teilen“, zusammengesetzt sind. Gemeint werden aber meist nur lebende oder soziale Systeme, wie man leicht aus der Analyse der Autoren erkennen kann, auf die sich die Darstellung der allgemeinen Prinzipien beruft. Hier werden aktuell überwiegend Maturana und Luhmann genannt. Die Arbeiten Bertalanffy's, des Begründers der allgemeinen Systemtheorie, der sich mit offenen chemischen Systemen befasste, werden wie die anderer früher Autoren höchstens noch als Alibi genannt.¹

Von der „allgemeinen Systemtheorie“ wird erwartet, dass sie klärt, welche Eigenschaften allen Systemen gemein sind. Diese Fragestellung impliziert die Antwort: Allen Systemen ist gemeinsam, dass sie aus zusammenwirkenden Teilen bestehen. Alles, was darüber hinausgeht, sind Eigenschaften, die nicht mehr allen Systemen, sondern nur jeweils einigen von ihnen zukommen. Diese aber sind *per definitionem* aus dem Untersuchungsgegenstand der allgemeinen Systemtheorie ausgeschlossen.

Die Teile fungieren in der allgemeinen Systemtheorie nur als gleiche Teile, Elemente, auch wenn von ihnen behauptet wird, sie seien unterschiedlich, denn von den Unterschieden wird nur gesagt, dass es sie gibt, sie werden aber nicht untersucht. Die Unterschiede werden nur in den unterschiedlichen Beziehungen (Relationen) gesehen, welche die „an sich“ gleichen Elemente eingehen.

Das hat zur Folge, dass die verschiedenen Gegenstände, die mit einer systemtheoretischen Fragestellung untersucht werden, auch die gleichen Eigenschaften zeigen. Das wird verschärft, wenn das bei der Untersuchung *eines* Gegenstandes entwickelte begriffliche und terminologische Instrumentarium bei der Untersuchung *eines anderen* Gegenstandes benutzt wird. Gerade dieses Verfahren ist bei der Migration des systemtheoretischen Vokabulars weithin zu beobachten. Termini einer anderen Wissenschaft werden zur Bezeichnung der jeweils eigenen Sachverhalte benutzt. So entstehen Formulierungen wie „Die „Gesellschaft als Organismus“, das „Lebewesen als Regelsystem“ usw.

Die so festgestellte Analogie zwischen Systemen wird in „reiner“ Form in mathematischen Gleichungen dargestellt. Das ließ die Frage entstehen, ob diese Analogien nicht darauf zurückgeführt werden könnte, dass es sich bei diesen Zusammenhängen nicht um physikalische, biologische oder soziologische Gesetzmäßigkeiten handelt, sondern um allgemeine Gesetze von Systemen schlechthin. Die Wissenschaft von solchen allgemeinen Gesetzen wurde zuerst von Bertalanffy (1938) als „allgemeine Systemtheorie“ bezeichnet.

Ohne die Berechtigung dieser Schlussfolgerungen zu erörtern muss wohl festgestellt werden, dass sich eine allgemeine Systemtheorie nicht auf diese eingeschränkte Sichtweise beschränken sollte und auch die Frage nach der Verschiedenartigkeit von Systemen bearbeiten sollte.

Dann können die Teile nicht mehr als gleichartige Elemente abgebildet werden, sondern als unterschiedliche „**funktionelle Komponenten**“. Systeme mit unterschiedlichen funktionellen Komponenten besitzen auch unterschiedliche Eigenschaften. Systeme mit den gleichen funktionellen Komponenten bilden Klassen von Systemen, deren Elemente Systeme sind. Alle Systeme einer Klasse sind von gleichem **Typ**. Die theoretische Bearbeitung solcher Typen und Klassen erfordert eine Terminologie, mit denen die verschiedenen Klassen von Systemen und Komponenten bezeichnet werden. Erforderlich ist also eine **allgemeine Taxonomie der Systeme**.

¹ Bertalanffy beschrieb Lebewesen als offene Systeme. Die Technikwissenschaften untersuchten Werkzeuge als technische Systeme. Prigogine beschrieb physikalische Entitäten und Lebewesen als komplexe Systeme. Wiener analysierte Lebewesen und Maschinen als kybernetische Systeme. Shannon beschrieb die Kommunikation als informationelles System. Maturana beschrieb Lebewesen als selbst organisierende, autopoietische Systeme. Parsons und Luhmann beschrieben schließlich Gesellschaften als soziale Systeme.

In diesem Teilprojekt werden nach der Methode des Aufsteigens vom Abstrakten verschiedene Typen von Systemen konstruiert und auf ihre spezifischen Eigenschaften untersucht. Dabei wird auch eine spezifische Terminologie vorgeschlagen.

Dieses Vorgehen ist auch ein Weg, die ahistorische Betrachtungsweise der allgemeinen Systemtheorie zu überwinden, indem gezeigt wird, wie unterschiedliche Typen von Systemen so auseinander entwickelt werden können, dass das jeweils folgende das vorausgehende als notwendige Stufe der Entwicklung voraussetzt und enthält. Dieses Vorgehen enthält also auch eine **allgemeine Chorologie** der Systeme. Taxonomie und Chorologie der Systeme sollten als Disziplinen der Systemtheorie etabliert werden.

2. Zum Systembegriff

Zum *terminus technicus* wurde der Ausdruck "System" bei der Bearbeitung von Problemen des Stoffwechsels der Lebewesen, die mit den Gesetzen der klassischen Thermodynamik nicht mehr hinreichend beschreibbar waren, da diese nur auf physikalische Körper zutreffen, die nur außerhalb der Beziehungen zu ihrer Umgebung Gegenstand der Thermodynamik waren. Lebewesen können aber nur in Beziehung zu ihrer Umgebung existieren, müssen also offen sein. Sie können folglich nur in einem Zustand des thermodynamischen Ungleichgewichts dauerhaft existieren. In der klassischen Thermodynamik der physikalischen Körper ist dieser Zustand nur zufällig und zeitweilig, denn er geht notwendig und spontan („freiwillig“) in das thermodynamische Gleichgewicht über. Damit aber werden auch die Komponenten des Ungleichgewichts, die thermodynamischen Phasen, zu flüchtigen, zeitweiligen Gebilden, für die es keine messbaren invarianten stoffunabhängigen Zustandsgrößen gibt.

Bertalanffy untersuchte nun mit den Lebewesen thermodynamische Systeme, die sich in einem stabilen Zustand des Ungleichgewichts befinden. Diesen Zustand bezeichnete er als „**Fließgleichgewicht**“ („steady state“). In diesem Zustand werden aber die für die klassische Thermodynamik nur zufällig und zeitweilig existierenden thermodynamischen Phasen zu Gebilden, die nicht nur dauerhaft existieren, sondern vor allem auch durch ein bestimmtes Zusammenwirken das Fließgleichgewicht und damit ihre eigene Existenz erst ermöglichen. Zur Bezeichnung eben dieses spezifischen Zusammenhangs eignete sich der Terminus „System“ nun in besonderer Weise. Er wurde von einem Wort der Umgangssprache zu einem wohl definierten wissenschaftlichen Begriff.

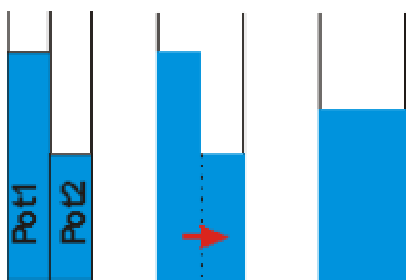


Abbildung 1: Zeitweilige Existenz eines isolierten Zweiphasenkörpers (Pot1, Pot2 Potentiale, gestrichelte Linie Phasengrenze, Pfeil Richtung des Potentialflusses))

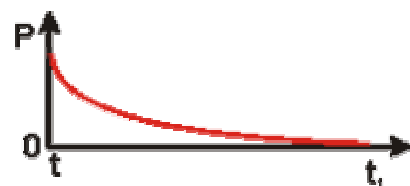


Abbildung 2 : Potentialdifferenz P zweier Phasen eines isolierten Zweiphasen-körpers in der Zeit. Die Länge der Zeit ist von der Beschaffenheit der Phasengrenze abhängig.

Damit verschwand das Wort „System“ natürlich nicht aus der Umgangssprache, es blieb gewissermaßen als „System i.w.S.“ im Unterschied zu dem nun definierten „System i.e.S.“ erhalten. Aber diese Unterscheidung wurde damals nicht getroffen und unterbleibt auch heute. Bertalanffy selbst hat die physikalischen Körper der klassischen Thermodynamik als Systeme geadelt, indem er sie im Unterschied zu den von ihm untersuchten und „offene thermodynamische Systeme“ genannten Entitäten als „geschlossene thermodynamische Systeme“ bezeichnete.

Diese sollten genauer als „isolierte Mehrphasenkörper in einem thermodynamischen Ungleichgewicht“ bezeichnet werden. Sie sind keine thermodynamischen Systeme i.e.S.,

denn sie bestehen nur zeitweilig aus verbundenen Teilen, den Phasen, die an der Phasengrenze verbunden sind (Abbildung 1 Mitte). Mit dem Erreichen des Gleichgewichts (Abbildung 1 rechts) verschwindet auch die Phasengrenze. Solange der Mehrphasenkörper von der Umgebung isoliert ist, ist die Existenz der Phasen ein zeitweiliger, zufälliger (kontingenter) Zustand des Körpers, der in einer bestimmten endlichen Zeit (Abbildung 2) spontan in den Gleichgewichtszustand ohne Phasen übergeht. Während dieser Zeit ist er zudem durch keine invarianten intensiven thermodynamischen Zustandsgrößen bestimmt. Er ist also nie derselbe. Durch die invarianten extensiven Zustandsgrößen ist er nur als Körper, nicht aber als System invariant und definierbar. Der Ausdruck „isoliertes thermodynamisches System“ ergibt deshalb keinen Sinn, ebenso wie etwa der Ausdruck „lebloses Lebewesen“. Betrachten wir nun statische Systeme. Die Theorie der statischen Systeme ist die Statik, beispielsweise Elektrostatik, Hydrostatik. Die invarianten Zustandsgrößen eines statischen Gleichgewichts sind die stoffbestimmten extensiven Zustandsgrößen wie Masse oder Volumen. Im Gleichgewicht haben alle Komponenten das gleiche Potential. Sie befinden sich alle auf derselben Äquipotentiallinie oder Äquipotentialfläche.

Das Gleichgewicht statischer Systeme bleibt solange erhalten, wie das System sich in keiner Wechselwirkung mit der Umgebung befindet. Statische Systeme sind in thermodynamischer Hinsicht geschlossene Systeme. Ihre intensiven (thermodynamischen) Zustandsgrößen wie Temperatur oder Druck können sich zwar ändern, sind aber ohne Bedeutung für das statische Gleichgewicht. Die invarianten Größen statischer Systeme sind die extensiven Zustandsgrößen.

Es stellt sich also die Frage, ob eine allgemeine Systemtheorie wirklich die Gemeinsamkeiten *aller* Systeme untersuchen soll, also die Gemeinsamkeiten von statischen und dynamischen Systemen. Obwohl mein Problem nicht die Frage der Gegenstandsbestimmung der allgemeinen Systemtheorie ist, musste diese Erörterung hier erfolgen, um den Gegenstand meiner Darstellung hinreichend genau zu bestimmen. „Systeme“ meint in meinen Ausführungen stets offene, thermodynamische Systeme, „Systeme i.e.S.“, auch wenn nur von Systemen ohne jeden weiteren Zusatz die Rede ist.

3. Die Minimalausstattung eines offenen Systems

Fließgleichgewichte sind dadurch gekennzeichnet, dass ein zwischen einzelnen Phasen eines thermodynamischen Systems bestehendes Ungleichgewicht in der Zeit, dauerhaft erhalten bleibt. Da der spontan eintretende Prozess, in dem sich das thermodynamische Gleichgewicht einstellt, nicht aufgehalten werden kann, muss er durch eine geeignete Ausstattung des Systems **erhalten werden**. Die dazu mindestens erforderlichen funktionellen Komponenten und deren Anordnung bilden die **funktionelle Minimalausstattung** des offenen thermodynamischen Systems.

Betrachten wir zunächst, wie sich das Gleichgewicht im isolierten Mehrphasenkörper einstellt. Dazu verwenden wir das hydrodynamische Modell der kommunizierenden Gefäße (Abbildung 3).

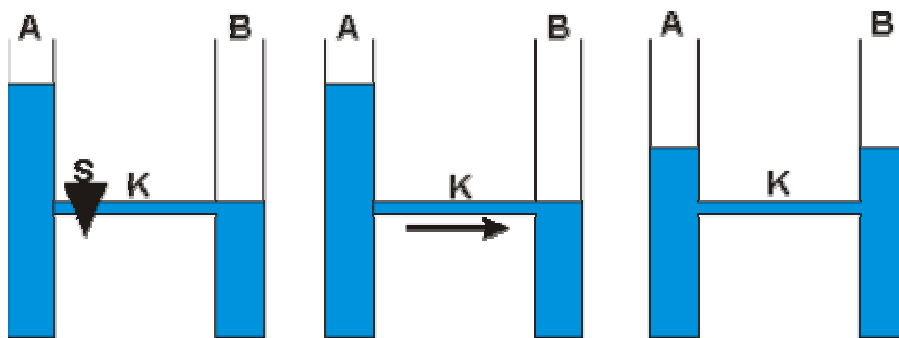


Abbildung 3: Kommunizierende Gefäße

Die Behälter A und B stehen für unterschiedliche thermodynamischen Phasen. Sie sind durch einen Kanal K verbunden, der die **innere Phasengrenze** modelliert. Er ist der zunächst durch einen Stöpsel S verschlossen. Die unterschiedliche Füllhöhe stellt das

unterschiedliche Potential dar. Wird der Stöpsel entfernt, entsteht im Kanal ein Flüssigkeitsstrom in Richtung des Potentialgefälles (Mitte).

Die jeweils aktuelle Fließgeschwindigkeit im Kanal hängt bei gegebener Membran von der jeweils aktuellen Potentialdifferenz ab. Da sich diese kontinuierlich verringert, verringert sich auch die Fließgeschwindigkeit (Abbildung 2).

Die Potentiale gleichen sich aus, der Fluss kommt nach einer gewissen Zeit zum Stillstand und die Füllhöhe beider Behälter ist gleich.

Bei gegebener Potentialdifferenz hängt die jeweils aktuelle Fließgeschwindigkeit und damit die Zeit, in welcher der Strom fließt, von der Beschaffenheit der durchlässigen Phasengrenze, der Membran, ab.

Die Phasengrenze ist Teil einer thermodynamischen Phase. An ihr bestehen diskontinuierliche Potentialdifferenzen zwischen den aneinander grenzenden Phasen. Die spezifische Zustandsgröße der Phasengrenze ist die **Fläche**. Die Anordnung der Systemgrenze im Raum bestimmt die **Gestalt** des Systems. Das System ist Kugel, Zylinder oder ein in beliebiger Weise aus Grundformen zusammengesetzter Körper. Diese Eigenschaft des Systems nenne sein **Design**.

Das **Systemdesign** bestimmt Anzahl und Verteilung der Poren einer Membran und damit bei gegebener Potentialdifferenz die Fließgeschwindigkeit des Potentialstroms.

Zufluss und Abfluss sind **äußere Membranen** des Systems. Sie verbinden die Phasen des Systems mit der **"Umgebung"**.

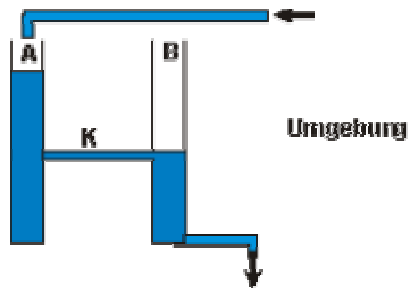


Abbildung 4: Offenes thermodynamisches System mit Zufluss und Abfluss

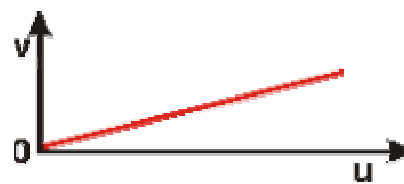


Abbildung 5 Die Abhängigkeit der Zuflussgeschwindigkeit v vom Umgebungspotential u

Umgebung kann die Außenwelt eines Systems nur sein, wenn sie eine Potentialdifferenz aufweist, die Zufluss und Abfluss ermöglichen. Bei einem (pumpenlosen) hydrodynamischen System muss der Zufluss "oben" und der Abfluss "unten" liegen. In dieser Bestimmung ist der Übergang vom umgangssprachlichen Terminus "Umgebung" zum systemtheoretischen Begriff dargestellt.

Zufluss und Abfluss wirken unabhängig voneinander auf die Potentiale des Systems und damit auf Fließgeschwindigkeit des Systems. Die Fließgeschwindigkeit ist nun nicht mehr von den Parametern der Inneren Membran abhängig, sondern von den Zu- und Abflussparametern. Sie sind diesen proportional (Abbildung 5), wobei der Proportionalitätsfaktor von den Parametern der äußeren Membran bestimmt wird. Bei gegebenen Parametern werden Zufluss- und Abflussgeschwindigkeit von den Potentialen der Umgebung bestimmt.

Mit dieser Ausstattung kann das System auf Veränderungen der Umwelt innerhalb der systembedingten Grenzen **"reagieren"**. Seine Fließgeschwindigkeit und seine Abflussgeschwindigkeit werden in vorhersagbarer Weise durch das Potential der Umgebung bestimmt.

Im Unterschied zum geschlossenen Mehrphasenkörper ist die Existenzzeit des Ungleichgewichts im offenen System nicht *systembedingt* begrenzt. Ohne äußere Einwirkung geht das Ungleichgewicht des Mehrphasenkörpers in das Gleichgewicht über. Im offenen System bleibt das Ungleichgewicht solange erhalten, wie Zufluss und Abfluss das

zulassen. Die Limitierung der Existenzzeit des offenen Systems ist nicht systembedingt, sondern wird durch die Umgebung bedingt.

Die Minimalausstattung des Systems umfasst also folgende Komponenten (Abbildung 5):

- zwei Phasen P1 und P2 mit unterschiedlichen Potentialen,
- die diese verbindende innere Phasengrenze iP ,
- äußere Phasengrenze $\bar{a}P$,
- Zufluss und Abfluss,
- eine Umgebung.

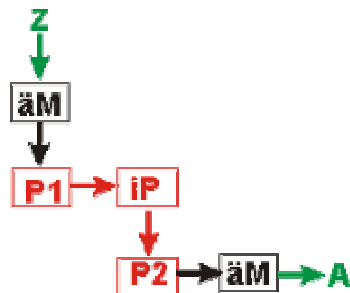


Abbildung 5: Minimalausstattung eines offenen Systems (Pfeile: Potentialdifferenzen, rot: sinngebende Komponente)



Abbildung 6: Potentialdifferenz P zweier Phasen eines offenen Systems in der Zeit

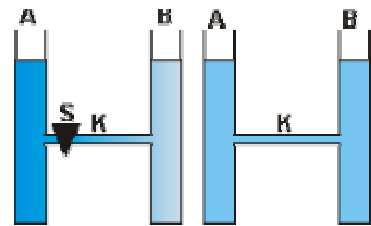


Abbildung 7: Körper mit Temperaturphasen (dunkel: hohe Temperatur)

Diese Komponenten müssen nun in einer bestimmten Weise designed werden, wenn eine dauerhafte Existenz des Systems gewährleistet werden soll. Die das Design bestimmende Komponente ist das Ungleichgewicht, das erhalten werden soll (Abbildung 5 rot gekennzeichnet). Das Design aller anderen Komponenten muss an dieser Komponente orientiert sein. So muss das Design der äußeren Membranen eine Durchflussgeschwindigkeit gewährleisten, die der Fließgeschwindigkeit im System entspricht. Ein solches Design nenne ich "**harmonisch**".

In der technischen Realisierung wird das Design durch die **Wand** gewährleistet, die keine Komponente der Minimalausstattung sondern eine **kontingente Komponente** ist

In einem harmonisch gestalteten System bleibt die Fließgeschwindigkeit im System solange konstant, wie Zufluss und Abfluss konstant bleiben. Dieser Zustand der konstanten Fließgeschwindigkeit ist das **Fließgleichgewicht** (steady state). Die Potentialdifferenz der Phasen des Systems ändern sich nicht (Abbildung 6).

Ein **System** entsteht also, wenn der Prozess der Annäherung an den Gleichgewichtszustand, der „**Strom**“ nicht in einer endlichen Zeit zum Stillstand kommt. Im System verändert sich die Fließgeschwindigkeit nicht und erreicht so nie den Wert 0. Das System befindet sich dauerhaft im Zustand des thermodynamischen Ungleichgewichts, dem Fließgleichgewicht.

Die Erhaltung der dauerhaften Existenz des Ungleichgewichts ist der Zweck, den das System erfüllen soll. Ich nenne diese Komponente die **sinngebende Komponente** des Systems.

Die Beziehungen (Prozesse) zwischen den Komponenten eines dynamischen Systems werden nur von den Potentialen ihrer nicht stoffeigenen (systemeigenen) Zustandsgrößen und ihren Design bestimmt. Beide sind gleichgültig gegen die stoffeigenen Zustandsgrößen. In die Systembeschreibung gehen die Komponenten des Systems nur als stoffunabhängige Träger von Potentialen mit einem harmonischen Design ein. Komponenten mit einem harmonischen Design nenne "**funktionelle Komponenten**".

Diese systemtheoretischen Bestimmungen sind unabhängig von der jeweiligen Zustandsgröße. Abbildung 7 zeigt einen Zweiphasenkörper im thermischen Ungleichgewicht. Er ist auf einer Seite wärmer als auf der anderen. Im Übrigen hat er das gleiche Design wie

die kommunizierenden Gefäße. Wenn der Stöpsel gezogen wird, kommt es im Kanal zu einem Wärmestrom, durch den die Temperaturdifferenz ausgeglichen wird. Das thermische Ungleichgewicht kann erhalten werden, wenn das System mit der Umgebung verbunden und von einer Seite geheizt und der andern gekühlt wird.

Auf den folgenden Seiten wird gezeigt, wie durch Konstruktion weiterer funktioneller Komponenten Systeme entwickelt werden können, welche die Erhaltung des Fließgleichgewichts in immer zweckmäßigerer Weise gewährleisten. Das minimale offene thermodynamische System stellt so die **Ausgangsabstraktion** für die Konstruktion weiterer Systeme dar.

4. Der Kreisprozess

Die funktionelle Minimalsausstattung des offenen Systems gewährleistet die Erhaltung des thermodynamischen Ungleichgewichts im Rahmen der vom Design bedingten Grenzen. Innerhalb dieser Grenzen **reagiert** das System auf Änderungen der Potentiale der **Umgebung**. Ein konstantes Ungleichgewicht kann erreicht werden, indem die Potentiale der Umgebung konstant gehalten werden. Das ist möglich, indem diese ein gemeinsames **Reservoir** bilden. Dadurch wird das offene System zum **Kreisprozess**. Das Reservoir muss sich jedoch auf dem niedrigen Potential befinden. Durch wird eine neue funktionelle Komponente erforderlich, die den fließenden Teil des Reservoirs auf das erforderliche höhere Niveau hebt. Diese Komponente ist der **Transporter** (Abbildung 1).

Die Umgebung eines Systems ist nicht einfach das, was sich außerhalb des Systems befindet. Wenn das System in der Umgebung existieren, d.h. dauerhaft sein internes Fließgleichgewicht auf der Basis des bestehenden Ungleichgewichts erhalten soll, dann muss die Umgebung gewisse Anforderungen des Systems erfüllen:

- Sie muss für die Zustandsgröße der sinngebenden Komponente eine Potentialdifferenz aufweisen, die größer ist, als die dieser Komponente.
- Die Äquipotentiallinien müssen oberhalb und unterhalb von denen der sinngebenden Komponente liegen.

Wenn diese Bedingungen nicht gegeben sind, kann das Fließgleichgewicht nicht erhalten werden, das System kann nicht existieren.

Die einfache Zusammenführung der Elemente der Umgebung in ein gemeinsames Reservoir kann diese Bedingungen nicht erfüllen. Sie ergäbe im günstigsten Fall einen Carnot'schen Kreisprozess (Abbildung 8). Deshalb muss dieses System durch eine weitere funktionelle Komponente ergänzt werden, die das Potential des Reservoirs durch eine Pumpe auf die erforderliche Höhe befördert (Abbildung 9).

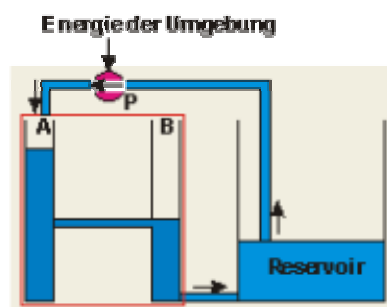


Abbildung 8 Idealer Carnot'scher Kreisprozess
(rot umrandet: sinngebende Komponente)

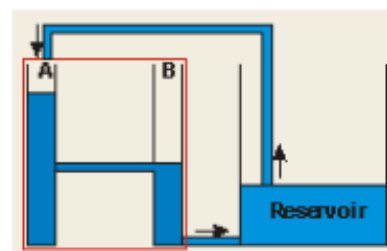


Abbildung 9: Realisierbarer Kreisprozess mit Transporter

Diese Komponente, der **"Transporter"**, ist bei flüssigen Substraten eine Pumpe. Sie pumpt das Substrat von dem niedrigen Potential des Reservoirs zum höheren Potential des Systems. Dazu ist Energie erforderlich, die aus der Umgebung zugeführt werden muss. Durch den Transporter wird das System partiell unabhängig von der Umgebung. Braucht das offene System das Substrat als Träger des Potentials, verfügt es über das Substrat nun selbst. Zufluss und Abfluss erfolgen durch das Reservoir als systemeigener Komponente. Aus der Umgebung ist nur noch Energie erforderlich, die auf das Substrat übertragen wird. Kreisprozesse spielen bei vielen technischen Anwendungen eine Rolle, beispielsweise bei Verbrennungsmotoren oder Wärmepumpen. Der durch die Energie der Sonne angetriebene Kreislauf des Wassers in der Natur ist eine natürliche Konstellation eines solchen Systems. Diese komplexen Systeme zeichnen sich durch gleichzeitig bestehende Potentialdifferenzen mehrerer Zustandsgrößen aus. Sie werden auf der folgenden Seite dargestellt.

5. Komplexe Systeme

Systeme lassen sich nach der Zustandsgröße unterscheiden, die das sinngewöhnliche Ungleichgewicht des Systems bilden. Dies können Unterschiede des thermischen, chemischen oder osmotischen Potentials sein. Sie bilden thermische, chemische oder osmotische Systeme. Systeme können gleichzeitig auch Potentialdifferenzen für mehr als eine Zustandsgröße aufweisen und sich so in mehrfacher Hinsicht im Ungleichgewicht befinden. Systeme mit mehreren Potentialdifferenzen nenne ich **"komplexe Systeme"**

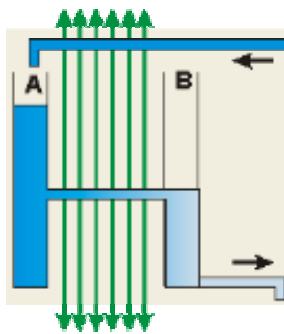


Abbildung 10: Komplexes System mit hydrodynamischer und thermischer Potentialdifferenz

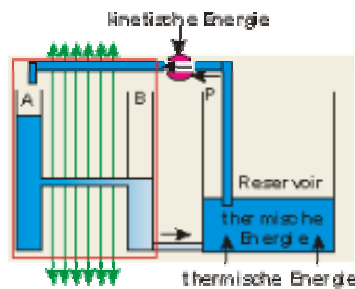


Abbildung 11: komplexer Kreisprozess in einem komplexen thermodynamischen System mit flüssiger Trägersubstanz (grün thermische Energie, rot eingerahmt: sinngewöhnliche Komponente)

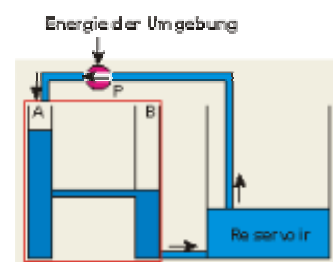


Abbildung 12: Zustand nach Erkalten

Abbildung 10 zeigt ein komplexes System mit einer hydrodynamischen und einer thermischen Potentialdifferenz. Der Zufluss versorgt das System mit warmem Wasser. Kaltes Wasser verlässt das System durch den Abfluss. Das Wasser besitzt einerseits potentielle Energie, die den Wasserstrom im Kanal bewirkt. Es ist zugleich Träger der thermischen Energie als Form innerer Energie. Im Kanal wird durch den Zufluss an warmem Wasser das Fließgleichgewicht des Wasserstroms aufrecht erhalten. Zugleich wird die thermische Energie an die Umgebung abgegeben und abgekühltes Wasser fließt ab.²

Auch dieses System kann zu einem **komplexen Kreisprozess** erweitert werden (Abbildung 11). Da im System zwei Energieformen eine Rolle spielen, muss das auch in der Umgebung der Fall sein. Neben der kinetischen Energie für die Pumpe ist thermische Energie zur Heizung des Reservoirs erforderlich. Ohne andauernde Aufheizung der Reservoirs würde das System wieder in einen einfachen Kreisprozess übergehen. Das Reservoir ist erkaltet, nur der Wasserfluss findet weiter statt (Abbildung 12).

² In der Natur gibt es solche Systeme beispielsweise als heiße Quellen.

5.1. Kombinierte Systeme

Komplexe Systeme können nun miteinander kombiniert werden. So kann die freigesetzte Wärmeenergie unseres Beispielsystems in einen weiteren Trägerkreislauf überführt werden. Die funktionelle Komponente, welche die thermische Energie von der kinetischen Energie des Trägers trennt und in den zweite Kreisprozess überführt, ist eine "**Schnittstelle**". Die thermische Energie kann an die Umgebung abgegeben oder zum Verrichten anderer Arbeit eingesetzt werden (Abbildung 13). Dieses Prinzip liegt beispielsweise der Wärmepumpe zugrunde.

Die Besonderheit dieses Konstrukts beruht darauf, dass die zu Betrieb erforderliche kinetische Energie unabhängig von der mit dem Träger transportierten thermischen (oder jeder anderen inneren) Energie ist. Deshalb kann die Menge der mit dem Träger übertragenen Energie deutlich größer sein als die erforderliche Menge an Transportenergie. Bei Wärmepumpen wird ein Verhältnis von etwa 1:4 erreicht.

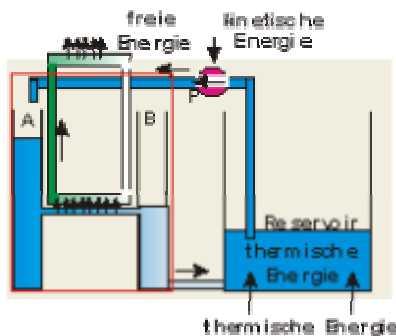


Abbildung 13: Kombiniertes System (grün: warmes Wasser, rot eingrahmt: sinngabende Komponente **Schnittstelle**)

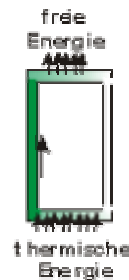


Abbildung 14: Eigenständiger thermischer Kreisprozess

Auch die Fließgeschwindigkeiten des Flüssigkeitsstroms und des Wärmestroms sind voneinander unabhängig. Sie sind nur von der Größe der jeweils wirkenden Potentialdifferenz abhängig und dieser proportional. Auch der zweite Kreislauf (im Beispiel der Wärmekreislauf) braucht einen eigenen Antrieb. Im Beispiel könnte das die Schwerkraft sein. Bei Erwärmung dehnt sich Wasser aus, seine Dichte sinkt und es steigt nach oben. Kaltes Wasser sinkt dagegen nach unten. Die durch die Temperaturänderungen bewirkten Dichteänderungen bauen eine eigenständige Potentialdifferenz auf, die als "Pumpe" in einem eigenständigen Kreisprozess ein eigenständiges Fließgleichgewicht in Gang halten. Der gesamte kombinierte Kreisprozess ist ein einheitliches System, ein Ganzes. Er wird durch die Energie der Umgebung angetrieben. Die sinngabende Komponente des Gesamtsystems ist das hydrodynamische Fließgleichgewicht AB. Durch die Pumpe wird seine hydrodynamische Potentialdifferenz erhalten. Sobald das System vom Zufluss an kinetischer Energie aus der Umgebung isoliert wird, kommt der Flüssigkeitsstrom zum Erliegen, das Fließgleichgewicht erlischt und das System geht in seinen Gleichgewichtszustand über.

Anders ist das bei der thermischen Energie. Wenn sie ausfällt, kühlt das System ab und es entsteht wieder ein einfacher Kreisprozess. Die thermische Energie wird nur durch das System hindurch transportiert. Wenn der thermische Kreisprozess jedoch ausfällt, würde ein thermisch isoliertes System sich bis zur Temperatur des Reservoirs aufheizen (und ggf. kollabieren). Die **Funktion** des thermischen Kreisprozesses ist also die Kühlung. Ohne Kühlsystem ist das komplexe hydrodynamisch-thermische System nur existenzfähig, wenn ihm nicht auch thermische Energie aus der Umgebung zugeführt wird. Dann aber hätte der zweite Kreisprozess keine Funktion (keinen Sinn), das System wären wieder nur ein einfacher Kreisprozess.

Hydrodynamischer und thermischer Kreisprozess sind eigenständige Kreisprozesse, die auch unabhängig voneinander ablaufen können und eine eigene sinngabende Komponente besitzen. Der thermische Kreisprozess verläuft außerhalb des kombinierten Systems

unabhängig von diesem nach den gleichen, eigenständigen Gesetzen (Abbildung 14). Seine sinngebende Komponente ist das thermische Ungleichgewicht. Allein stehend hat es jedoch keine Funktion. Seine Funktion erhält es erst aus seiner Einordnung in das komplexe System mit anderer sinngebender Komponente. Durch diese Einordnung erhält es als neue, ihm fremde sinngebende Komponente die des anderen Systems. Das geschieht durch die Schnittstelle. Dieser ihm fremde Sinn ist seine Funktion. In einem Heizungssystem kann der thermische Kreisprozess auch die Funktion der Heizung erfüllen und die sinngebende Komponente sein.³

³ Bisher ist nur von artefiziellen Systemen die Rede, die ihren Sinn von ihrem menschlichen Designer erhalten. Die Frage nach dem Sinn von Komponenten natürlicher Systeme wird später zu erörtern sein.

6. Autonome Systeme

Die Unabhängigkeit der Teilsysteme eines kombinierten Systems macht es auch prinzipiell möglich, die in das thermische System übertragene Energie zum Betrieb der Pumpe zu benutzen, welche den Energieträger des hydrodynamischen Teilsystems transportiert (Abbildung 15).

Dazu muss die Pumpe durch eine weitere Schnittstelle mit dem thermischen Kreisprozess verbunden werden. Diese Änderung des Designs hat nun gravierende Folgen für das Gesamtsystem. Das System wird **autonom**.

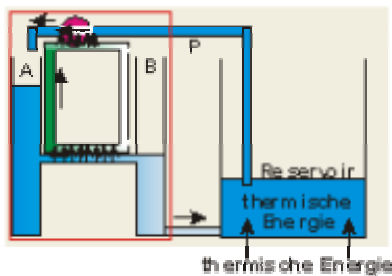


Abbildung 15: Autonomes System (kinetische Schnittstellen)

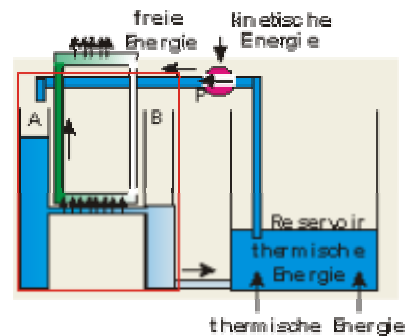


Abbildung 16: Nicht autonomes System

Im nichtautonomen System hat die Pumpe keine energetische Schnittstelle mit dem System. Sie bezieht ihre Energie aus der Umgebung, auf die das System keinen Einfluss hat. Ihre Funktion, ihr Sinn wurde ihr von einem äußeren Designer verliehen.

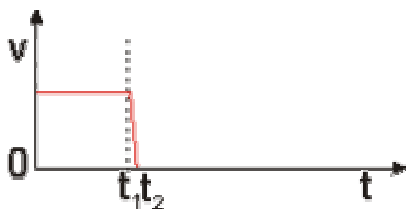


Abbildung 17: Fließgeschwindigkeit bei einem idealen autonomen System. Zum Zeitpunkt t_1 wird das System isoliert. In der Zeit $t_1 \dots t_2$ existiert das System isoliert, es ist zeitweilig autonom.

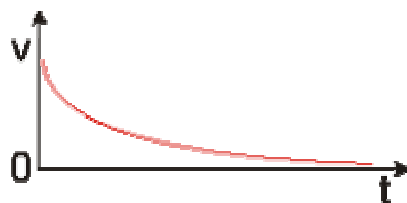


Abbildung 18: Fließgeschwindigkeit bei einem idealen nicht autonomen System

Diese Konstruktion weist nun eine Reihe von Besonderheiten auf, die alle daraus resultieren, dass die sinngebende Komponente sich selbst antreibt.

Das Fließgleichgewicht erhält sich selbst mittels Energie, die das System selbst *aufnimmt*. Die sinngebende Komponente wirkt also auf sich selbst. Erst im autonomen System hat die Floskel "sich selbst" einen Sinn.

Das autonome System ist nicht mehr unmittelbar von der Umgebung abhängig. Es bezieht seine Betriebsenergie aus seinem Reservoir. Für eine gewisse Zeit kann es sich deshalb selbst auch als isoliertes System erhalten (Abbildung 17). Das autonome System ist also zur zeitweiligen **Selbsterhaltung** fähig, ist zeitweilig **autonom**. Die Zeit, während der sich das System selbst erhalten kann, ist von der Größe der Reservoirs (Volumen, Potential usw.) abhängig (Abbildung 17 rechts).

Wenn das System dagegen nicht von der Umgebung isoliert ist, wird durch die Entnahme von thermischer Energie aus dem Reservoir eine Potentialdifferenz zwischen Reservoir und Umgebung geschaffen, die den weiteren Zufluss an thermischer Energie aus der Umgebung

in das Reservoir gewährleistet. Diese Potentialdifferenz zwischen System und Umgebung, die den ständigen Zufluss von Energie in das System gewährleistet, wird also durch das autonome System selbst geschaffen. Das autonome System versorgt sich so selbst mit Energie.

Für das nicht autonome System dagegen hat die thermische Energie des Reservoirs entweder keine Bedeutung oder sie wirkt im Falle thermischer Isolation des Systems als Störung, die Kühlung erforderlich macht. Das autonome System kann nur solange unverändert existieren, wie thermische Energie aus der Umgebung zufließt, das nicht autonome System kann nur solange existieren, wie keine Energie aus der Umgebung zufließt oder wie die zufließende Energie wieder entfernt wird.

Wenn ein solches System vom Designer geschaffen worden ist, muss auch das ideale System schließlich noch in Gang gesetzt werden, indem die Pumpe gestartet wird. Dazu ist eine **Aktivierungsenergie** erforderlich, die einmalig von außen zugeführt werden muss.⁴

Die Geschwindigkeit, mit der die Prozesse eines Systems ablaufen, wird durch das Design bedingt. Es vergeht also eine gewisse Zeit zwischen dem Start der Pumpe, mit dem der Pegel des Reservoirs zu sinken beginnt, und dem dem Beginn des Rückflusses in das Reservoir, mit dem der Pegel wieder zu steigen beginnt.

Diese Senkung des Pegels wirkt sich auf die Leistung der Pumpe aus. Diese hat eine spezifische Kapazität, die durch ihr Design bedingt ist. Das Maß, in dem diese als konstant gesetzte Kapazität ausgeschöpft wird, wird durch die Parameter des Systemdesigns bestimmt. Im hydraulischen System ist dies die Hubhöhe, die durch die Größe und Lage des Reservoirs bestimmt ist. Im thermischen System ist dies die vom hydraulischen System transportierte Wärmemenge. Im Zustand der Isolation nimmt diese fortlaufend ab. Dadurch sinkt in der Folge die Leistung der Pumpe, und die Fließgeschwindigkeit verlangsamt sich. Dadurch wird aber auch die Menge der an das thermische System übertragene Energie verringert, was die Leistung der Pumpe weiter verringert. Alle Systemprozesse werden langsamer. Die zurückfließende Trägerflüssigkeit ist nun kalt (arm an thermischer Energie). Dadurch wird die thermische Energie des Reservoirs verringert, was ebenfalls zu einer Verringerung der Leistung der Pumpe führt.

Das autonome System wirkt also auf sich selbst zurück. Alle diese Rückwirkungen (**feedbacks**) führen über die Verringerung der Fließgeschwindigkeit der sinngebenden Komponente zu einer Verlängerung der Existenzzeit des Systems.

Wird die thermische Isolation aufgehoben und dem Reservoir thermische Energie zugeführt (Heizung), dann wird (bei gleicher Fließgeschwindigkeit) mehr Energie zur Pumpe übertragen deren Leistung erhöht sich und bleibt bei konstantem Zufluss an thermischer Energie auf dem Niveau des Energiezuflusses konstant. Unter dieser Bedingung ist auch die Existenzzeit des autonomen Systems unbegrenzt.

Im Vergleich zum nicht autonomen System ist das autonome System von weniger Umgebungsfaktoren abhängig (Abbildung 16)

7. Stabile Systeme

Das autonome System ist während der Zeit seiner Existenz **labil**, d.h. seine Fließgeschwindigkeit ist nicht konstant, sondern verringert sich kontinuierlich. Das wird durch seine Rekursivität bedingt. Das nur negative feedback bewirkt, dass die Fließgeschwindigkeit nicht linear, sondern exponentiell abnimmt, wodurch sich die Existenzzeit des Systems verlängert. Der kontinuierliche Abfall der Fließgeschwindigkeit kann durch die Entwicklung von funktionellen Komponenten, die das System steuern, verhindert werden. Diese Komponenten machen das System **stabil**.

Während der Existenzzeit des autonomen Systems ist die Fließgeschwindigkeit des Systems zu jedem Zeitpunkt von der der Pumpe zugeführten Energie abhängig und ist dieser proportional. Zu jedem Zeitpunkt t_i gilt also

⁴ Bei artefiziellen Systemen ist der Designer auch der Starter. Die Annahme der natürlichen Entstehung eines autonomen Systems durch "Urzeugung" lässt als Erklärung den Zufall zu. Die Frage nach dem Starter ist damit aber noch nicht beantwortet.

(1)

$$V = k \cdot Q$$

wobei V die Fließgeschwindigkeit, Q die aufgenommene Wärmemenge und k ein vom Design bestimmter Proportionalitätsfaktor ist. Die Fließgeschwindigkeit erreicht den Wert 0, wenn keine Wärme mehr übertragen wird und so auch Q den Wert 0 erreicht.

Die Komponente, welche die fortlaufende Verringerung der Fließgeschwindigkeit aufhalten soll, müsste also die Fließgeschwindigkeit mit abnehmender Energiezufuhr nicht proportional verringern, sondern umgekehrt proportional erhöhen. Für das durch diese Komponente bewirkte Systemverhalten müsste also

(2)

$$V = k \cdot 1/Q$$

gelten.

Das kann durch eine Komponente mit geeignetem Design erreicht werden. An der thermischen Schnittstelle werden beide Systeme durch eine Steuerkomponente miteinander verbunden. Im Energiekanal wird ein Ventil angebracht, das mit einem Zeiger im Kanal für das energiearme Substrat verbunden ist (Abbildung 19).

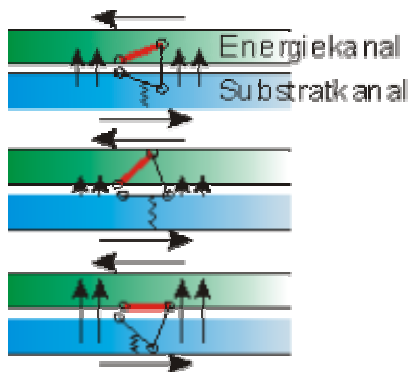


Abbildung 19: Steuerkomponente (rot Stellglied, schwarz Regler)

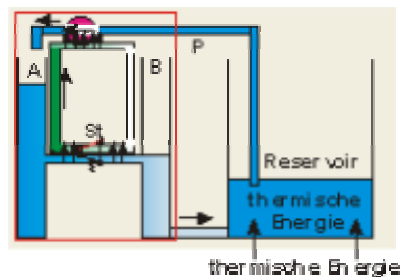


Abbildung 20: Autonomes System mit Steuerkomponente St (thermische Schnittstelle, S. Abbildung 19!)

Dieses Design gewährleistet, dass bei hoher Fließgeschwindigkeit und damit hoher Wärmezufuhr das Ventil im Energiekanal geschlossen wird (Abbildung 19Mitte). Je mehr energiearmes Substrat fließt, desto kleiner wird die Durchflussöffnung des Ventils und desto niedriger wird die Durchflussgeschwindigkeit für die Energie zum Antrieb der Pumpe. Die Pumpe arbeitet langsamer, so dass weniger Substrat transportiert wird. Dadurch verringert sich wieder die Fließgeschwindigkeit.

Hohe Wärmezufuhr der sinngebenden Komponente bremst also die Leistung der Pumpe und verringert so die Fließgeschwindigkeit und umgekehrt (Abbildung 19unten).

Das Design des Systems bestimmt auch, wie viel Zeit von einem Steuerereignis der Schnittstelle über die von ihm ausgelösten Veränderung der Fließgeschwindigkeit bis zum folgenden (entgegengesetzten) Steuerereignis vergeht. Diese Zeit ist die **Taktzeit**. Die Folge der entgegengesetzten Steuerereignisse führt dazu dass die Fließgeschwindigkeit zu **schwingen** beginnt. Diese Schwingungen werden grafisch als Sinuskurve dargestellt. Die Parameter dieser Schwingung (Amplitude, Frequenz) werden durch das Design bestimmt.

Die Schwingung wird also durch die Eigenschaften des autonomen Systems bestimmt, sie hängt nicht von der Umwelt ab, sondern erfolgt autonom. Im isolierten System erfolgt sie erfolgt solange, bis die Energieressourcen verbraucht sind. Bei konstanter Versorgung der Reservoirs mit thermischer Energie kann das System zeitlich unbegrenzt existieren.

Die erreichte systemerhaltende Fließgeschwindigkeit ist also Resultat des Zusammenwirkens aller funktionellen Komponenten des Systems, ist ihr „**Erfolg**“. Dieses "Verhalten" eines autonomen Systems nenne seine "**Aktionen**". Die Aktionen ist auf den Erfolg gerichtet.

Aktionen sind von Reaktionen auf äußere Einwirkungen zu unterscheiden, wie sie bei nicht-autonomen Systemen anzutreffen sind. Bei diesen ist die Prozessgeschwindigkeit des

Fließgleichgewichts nicht vom System, sondern von der Intensität der äußeren Einwirkung abhängig, der Prozess selbst hat keinen Einfluss auf seine eigene Geschwindigkeit.

Die Steuerkomponente verbindet das hydrodynamische mit dem thermischen System und erfüllt damit die Funktion einer Schnittstelle zwischen zwei eigenständigen Teilsystemen. Es wird jedoch weder Substrat noch Energie übertragen. Die Leistung der Steuerkomponente ist von anderer Art. Ihre Beschreibung erfordert eine neue Terminologie, die von **Informationstheorie**, **Kommunikationswissenschaften** usw. bearbeitet und entwickelt werden. Hier soll nur beispielhaft angedeutet werden, wie deren Grundkategorien aus dem Konstrukt des stabilen autonomen Systems abgeleitet werden können. Das erfolgt auch nur soweit, wie das zum Verständnis der nachfolgenden Texte erforderlich ist.

Durch das Design des Gesamtsystems ist die ständige Rückkopplung des Substratkreises mit dem thermischen Kreis gewährleistet. Die beschriebene Einordnung der Steuerkomponente in das Gesamtsystem führt dazu, dass das System geregelt wird. Zur Organisation der Rückkopplung sind keine gesonderten Komponenten erforderlich, sie erfolgt ja durch das System selbst. Die Steuerkomponente besteht bisher aus zwei Gliedern, die in diesem Zusammenhang als Teile eines (noch unvollständigen) Regelkreises angesehen werden können, als "Stellglied" und als "Regler" (Abbildung 19).

Indem die sinngebende Komponente durch den Regler das Ventil des Energiekanals stellt, übermittelt es diesem ein **Kommando**. Das ist eine **Nachricht** über den Erfolg einer Aktion des Gesamtsystems. Das Maß des Erfolgs der Aktion ist die **Information**, die mit der Nachricht übermittelt wird. Dieses Maß wird nach der Gleichung (2) in das Kommando umgerechnet.

In der Shannonschen Formel ist I die Informationsmenge eines von p möglichen Ereignissen:

$$(3) \quad I = \ln \cdot 1/$$

Die Affinität der Gleichung (2) zu der bekannten Shannon'schen Informationsformel (3) liegt auf der Hand. Die Funktion der Steuerkomponente besteht also auch darin, die Information zu erzeugen, mit der das Ventil gesteuert wird.

Die Steuerkomponente überträgt die Information nicht, sondern erzeugt sie, bringt sie hervor. Von Übertragung könnte man sprechen, wenn sie vor dem Akt bereits vorhanden wäre (wie Substanz oder Energie). Das ist aber nicht der Fall.

Die Kategorie der Nachricht ist eine genuin systemtheoretische Kategorie. Sie bezeichnet ein bestimmtes Verhältnis zweier Komponenten eines stabilen autonomen Systems. Dieses Verhältnis ist die **Kommunikation**.

Es ist offensichtlich, dass das hier dargestellte Modell des Verhaltens nicht autonomer Systeme dem behavioristischen Verhaltensmodell der Verhaltensbiologie entspricht. Solange aber die Tätigkeit der Tiere auf ein solches Modell abbildet, begreift sie diese nur als nicht autonome Automaten, nicht aber als Lebewesen.

8. Sensorische Systeme

Stabile autonome Systeme können sich dauerhaft nur in einer Umgebung erhalten, die einen *konstanten* Zufluss an Energie gewährleistet. Wird der Zufluss aus der Umgebung jedoch zu einer variablen Größe, führt das zu einer Veränderung der Parameter der Schwingung der Aktionsgeschwindigkeit, was die Existenz des autonomen Systems gefährden und zu seinem Zusammenbruch führen kann (Abbildung 21). Dem kann wieder nur durch eine geeignete funktionelle Systemkomponente abgeholfen werden, die Informationen über Veränderungen der Umwelt erzeugt, bevor diese Einfluss auf die Systemprozesse nehmen können.

Dazu dient eine weitere funktionelle Komponente, mit dem das System über einen **Sensor** direkt Informationen über Veränderungen der Umgebung erzeugt. Diese Komponente wird durch Erweiterung der bereits vorhandenen Steuerung konstruiert (Abbildung 22). Der Sensor ist eine eigenständige Entität, die Gesetzen unterliegt, die nichts mit dem autonomen System zu tun haben. So kann der Temperatursensor in Abbildung 5 als Bimetallsensor

konzipiert werden, der Informationen mechanisch auf ein Übertragungsglied übertragen, das mit der Steuerung verbunden ist.

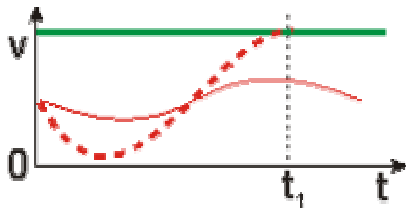
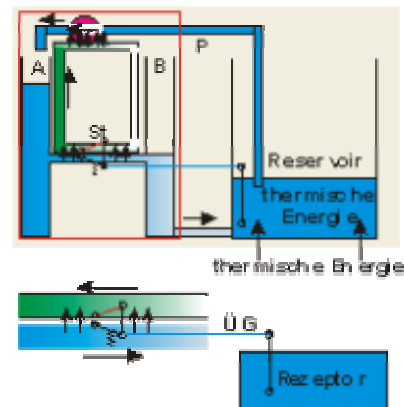


Abbildung 21: Umgebungsbedingte Veränderung der Schwingungsparameter (gestrichelte Linie). Zum Zeitpunkt t_1 wird der designbedingte Grenzwert erreicht (grüne Linie), das System kollabiert.

Abbildung 22(links): Sensorisches System (ÜG: Übertragungsglied)



Eine gesonderte Bezeichnung beispielsweise als "Sensor" ist erforderlich, weil er als Messglied außerhalb der systembestimmenden Potentialdifferenzen angeordnet sein muss und deshalb durch ein gesondertes Übertragungsglied mit der Steuerkomponente verbunden werden muss. Das Übertragungsglied überträgt die im Sensor erzeugte Information als Nachricht an die Steuerungskomponente.

Mit der Konstruktion des Sensors wurde ein weiteres Element des Regelkreises erforderlich, das "Messglied".

Die vom Messglied übermittelten eigenständigen Nachrichten unterscheiden sich nun kategorial von den Nachrichten des systemeigenen Stellglieds. Sie sind keine Information über den Erfolg der Aktion, denn sie werden bereits erzeugt, bevor die Aktion stattfindet. Sie sind **Signale** über zu erwartende Erfolge. Sie sollen als „**Signalnachrichten**“ bezeichnet und von den „**Erfolgsnachrichten**“ des Stellglieds unterschieden werden.

Das „Signal“ ist also eine Eigenschaft der Umwelt, der das autonome System eine Erwartung **zuschreibt**. Diese Zuschreibung erfolgt durch die Verbindung von Sensor und Steuerung.

Indem das autonome System durch die Verbindung zwischen Steuerung und Sensor die Umwelt kontaktiert, weist sie der angetroffenen Eigenschaft der Umwelt einen Erwartungswert zu, der durch die Stellung des Stellglieds definiert ist. Das System kann nur dann weiter existieren, wenn diese Zuweisung der Erhaltung des Systems dient, wenn also die vom Sensor erzeugten Nachrichten die Aktion systemerhaltend steuern. Anderenfalls bricht das System zusammen.

Im Unterschied zur direkten Steuerung durch den Erfolg kann das System seine Aktionen bereits auf eine zu erwartende Veränderung der Umgebung einstellen und damit erheblich schneller agieren. Über Signale kann das autonome System aber auch **manipuliert** werden, indem die Stellung des Sensors künstlich beeinflusst und die dadurch ausgelöste Veränderung der Aktionen und Bewegungen des Systems beobachtet werden. Aus solchen Manipulationen besteht im Wesentlichen die Toolbox der experimentellen Verhaltensbiologie. Dass diese nichts über das Wesen des autonomen Systems zutage fördern kann, liegt auf der Hand, da der dem Ganzen zugrunde liegende sinngebende Prozess aus der Analyse ausgeschlossen ist.

9. Kinetische Systeme

Die Konstruktion autonomer Systeme, bei denen die innere Energie vom Substrat getrennt und in einem gesonderten Kreisprozess zum Antrieb der systemeigenen Pumpe genutzt wird, eröffnet Möglichkeiten zu einer vielfältigen Entwicklung dieser Designvariante. In dieser Ausstattung kann das autonome System beliebige funktionelle Komponenten antreiben. Durch die Kombination mit kinetischen Komponenten, welche die zugeführte Energie in Bewegungsenergie umzuwandeln vermögen, wird das System zur **Selbstbewegung** fähig.

Je nach Ausstattung des Systems mit steuernden Komponenten kann es so zu unterschiedlichen Formen der Fortbewegung fähig gemacht werden.

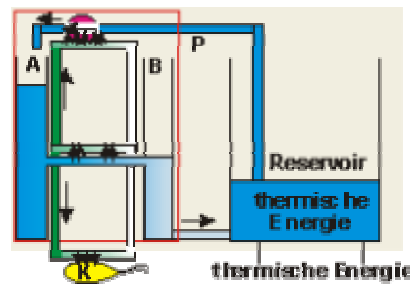


Abbildung 23: Ungerichtete Bewegung, "Zappeln" (K kinetische Komponente, Schnittstellen)

Abbildung 23 stellt die Designvariante eines kinetischen Systems auf der Basis eines einfachen autonomen Systems dar. Die infolge der Rekursivität dieses Systems eintretende Rückwirkung steuert nicht nur die Geschwindigkeit der Stoffaufnahme, sondern auch die Geschwindigkeit der Bewegung. Erfolg und Bewegung sind proportional. Bei großem Erfolg bewegt sich das System schneller als bei geringem Erfolg. Die Richtung der eingeschlagenen Bewegung ist zufällig und in keiner Weise vom Erfolg abhängig. Das System zappelt mit einer dem Erfolg proportionalen Geschwindigkeit.

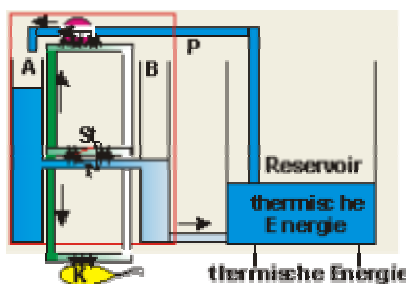


Abbildung 24: Gesteuerte Bewegung, Kinese (K kinetische Komponente, Schnittstellen S.90)

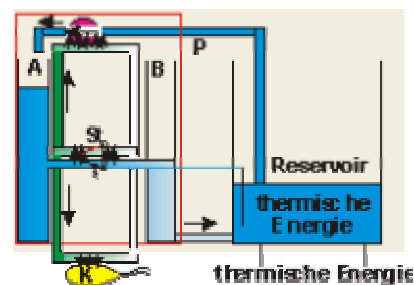


Abbildung 25: Signalgesteuerte Kinese (K kinetische Komponente, Schnittstellen S. 95 ff)

Abbildung 24 stellt die Designvariante eines kinetischen Systems auf der Basis eines stabilen autonomen Systems dar. Auch hier erfolgt die Steuerung durch den Erfolg der Aktion. Da der Erfolg der Aktion jedoch durch eine Steuerkomponente gesteuert wird, ist die Geschwindigkeit dem Erfolg der Aktion umgekehrt proportional und das gilt auch für die Geschwindigkeit der Bewegung. Das System zappelt umso langsamer, je größer der Erfolg der Aktion des Systems ist.

Das hat nun gravierende Auswirkungen. In einer Umgebung, in der das System erfolgreiche Aktionen ausführen kann, zappelt es nur sehr langsam und ermöglicht so einen längeren Aufenthalt in dieser Umgebung. Nimmt der Erfolg der Aktionen ab und das System verlässt die ungünstige Umgebung. Die Richtung, in der die ungünstige Umgebung verlassen wird, ist auch hier zufällig. Wird die Umgebung noch ungünstiger, bewegt sich das System schneller, wird diese jedoch günstiger, bewegt es sich langsamer und verweilt länger. Das System kommt in einer Umgebung zur Ruhe, in der es Erfolg hat. Bei ausbleibendem Erfolg entfernt es sich. Ein solches System würde sich folglich nur in einer Umgebung aufhalten, in der es in der die Aktionen erfolgreich sind, durch die es sich erhalten kann. Eine Umgebung, die seine Existenz gefährdet, würde es jedoch verlassen. In der Biologie nennt man diese Bewegungsform „Kinese“.

Abbildung 25 stellt die Designvariante eines kinetischen Systems auf der Basis eines sensorischen autonomen Systems dar. Auch sein Verhalten ist als Kinese zu bezeichnen. Das System kommt in einer Umgebung zur Ruhe, in der es Erfolg hat. Bei ausbleibendem

Erfolg entfernt es sich. Da das System den Erfolg bereits erwartet, bevor er eintritt, kann es seine Bewegungen auch viel schneller auf die Erwartungen des Systems einstellen. Es verlässt ungünstige Bedingungen schon bevor der Misserfolg eingetreten ist und verweilt in günstigen bereits dann, wenn der Erfolg sich gerade einzustellen beginnt.

Die **signalgesteuerte Kinese** ermöglicht es dem System, seine Aktionen zur Selbsterhaltung effektiver auf die jeweils gegebenen Bedingungen der Umgebung einzustellen, als dies bei der einfachen Kinese der Fall ist.

Auch Systeme mit signalgesteuerter Kinese können manipuliert werden ()

Ein solches System ähnelt dem „Wesen 1“, einem „Braitenberg'schen Vehikel“. Im Unterschied zu diesem kann das sensorische System seine Bewegung nicht nur durch Signale steuern.⁵ Das System überprüft durch das tatsächlich eingetretene Fließgleichgewicht die Information über die Erwartung und kann sie jederzeit durch unmittelbare Steuerung korrigieren.

Das Kriterium dieser Prüfung ist das Fließgleichgewicht der sinngebenden Komponente des Systems. Die Selbsterhaltung des Systems als Bewertungskriterium der erwarteten Änderungen der Umgebung muss nicht als gesonderte Komponente konzipiert werden, sondern ist immanentes Merkmal stabiler autonomer Systeme, das durchaus sinnvoll als **Ziel** des Systems bezeichnet werden kann. Diese **Zielorientiertheit** wird durch die Kombination der Komponenten des Systems bewirkt und wird so zu einer physikalischen Entität.

Braitenbergs Wesen bleiben dagegen Automaten, die die Resultate ihrer Bewegung nicht zu bewerten vermögen und die daher auch nicht der Selbsterhaltung dienen und so keinen Sinn haben. Sie agieren nicht, sie reagieren blind auf äußere Einwirkungen. Sie modellieren das, was in der Verhaltensbiologie weithin unter "Verhalten" verstanden wird.

Das bisher konstruierte kinetische autonome hydrodynamische System ist also (nachdem es gestartet wurde) zu einer zielstrebigten Bewegung aus eigenem Antrieb fähig. Es zeigt also Merkmale, die gewöhnlich nur lebenden Systemen zugeschrieben werden. Warum also sollte ein solches System nicht als „hydraulisches Lebewesen“ bezeichnet werden? Dieser Frage will ich mich auf der folgenden Seite zuwenden.

⁵ Valentino Braitenberg stellt in seinem lesenswerten Buch "Vehikel" dar, wie mit einfachsten Sensoren ausgestattete Fahrzeuge autonom auf Reize reagieren. Er zeigt, dass auch sehr komplexes Verhalten durch einfache Steuermechanismen erreicht werden kann. (Braitenberg, Valentin (1993): Vehikel. Experimente mit kybernetischen Wesen, MMV Medizin Verlag GmbH)

10. Aktive Systeme

Das autonome System kann seine interne Potentialdifferenz nur im Zustand der Isolation und nur für eine gewisse Zeit erhalten. Es ist zeitweilig autonom. Nur in dieser Zeit ist seine Existenz von äußeren Einwirkungen unabhängig.

Als isoliertes System kann es auch keine Energie aus der Umgebung aufnehmen, selbst wenn eine geeignete Umgebung zur Verfügung steht. Die dauerhafte Existenz des Systems erfordert folglich neue funktionelle Komponenten, welche die Aufnahme von Energie aus der Umgebung ermöglichen.

Wenn die Existenzzeit des autonomen Systems abgelaufen ist, hat die Potentialdifferenz, die den sinngebenden Prozess des Systems bildet, den Wert 0 erreicht. Dann erreichen auch alle anderen Potentialdifferenzen den Wert 0 und das System hat sein thermodynamisches Gleichgewicht erreicht. Alle Prozesse kommen zur Ruhe, das System ist „tot“ (Abbildung 26).

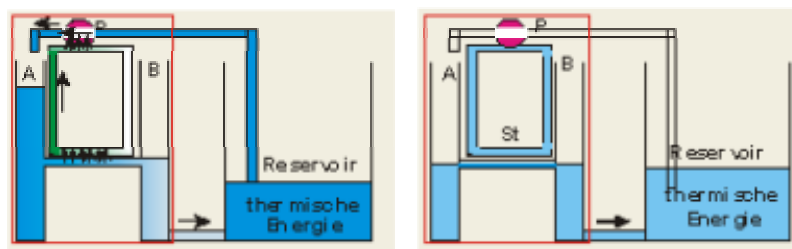


Abbildung 26: "Totes" autonomes System (links) und aktives autonomes System

Da in unserer Konstruktion die Betriebsenergie Wärme ist, die mit Wasser als Substrat transportiert wird, ist eine Umgebung mit warmem Wasser erforderlich. Wie Abbildung 27 links zeigt, reicht es dazu nicht, das Reservoir durch Zu- und Abflusskomponenten mit der Umgebung zu verbinden. Die Abbildung zeigt das tote System in warmem Wasser schwebend. Da in dieser Konstellation keine hydrodynamische Potentialdifferenz zwischen System und Umgebung besteht, kann das warme Wasser der Umgebung nicht in das System gelangen. Allenfalls kann es zu einer gleichmäßigen Erwärmung des Systems kommen, nicht aber zu einer hydrodynamischen Potentialdifferenz, die den sinngebenden Prozess dieses Systems ermöglichen würde.

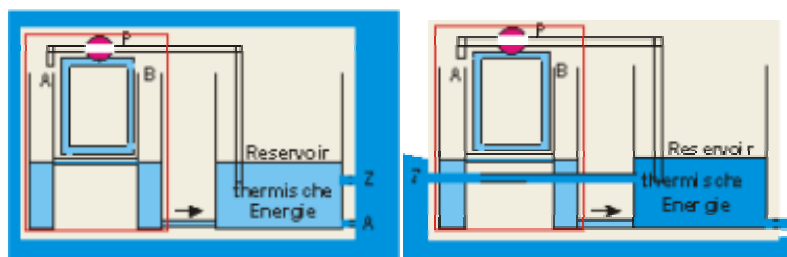


Abbildung 27 : Links: totes System in energiereicher Umgebung (mittelblau, Z Zufluss, A Abfluss), rechts: Totes System in fließendem Warmwasser

Daran würde auch ein Design wie in Abbildung 27 rechts dargestellt nichts Grundsätzliches ändern. Das System befindet sich in fließendem warmem Wasser, so dass eine hydrodynamische Potentialdifferenz entsteht. Es würde zwar warmes Wasser in das Reservoir fließen, die sinngebende Potentialdifferenz könnte aber so auch nicht wieder entstehen.

Dazu wäre ein Starter erforderlich, der mit externer Energie die Pumpe in Gang setzt, welche die sinngebende Potentialdifferenz wieder herstellt. Erst danach könnte das System wieder arbeiten. Es hätte aber seine Autonomie verloren, denn es ist passiv auf die Zufuhr der Startenergie aus der Umgebung angewiesen. Seine zeitweilige Autonomie erhält es erst

wieder, wenn es von der Energiezufuhr isoliert wird. Ein totes System kann also in keinem Fall von allein wieder zu arbeiten beginnen. Es muss von außen gestartet werden.

Nach einem Start ist nur ein System in der in Abbildung 27 rechts gezeigten Konstellation funktionsfähig, bei der eine Potentialdifferenz zwischen System und Umgebung die ständige Zufuhr von Energie gewährleistet. Damit ist aber die Autonomie des Systems wieder aufgehoben, denn die Parameter der Systemaktivität werden wieder durch die Umgebung determiniert.

In der Konstellation von Abbildung 27 rechts ist sowohl eine thermische wie eine hydrodynamische Potentialdifferenz gegeben, es genügen Zufluss und Abfluss als neue funktionelle Komponenten. In der Konstellation von Abbildung 27 links ist dagegen nur eine thermische Potentialdifferenz gegeben. Ein Potentialfluss des Wärmeträgers ist so nicht möglich. Dazu sind funktionelle Komponenten erforderlich, welche die fehlende hydrodynamische Potentialdifferenz ersetzen. Die Abbildung 28 zeigt zwei mögliche Lösungen.

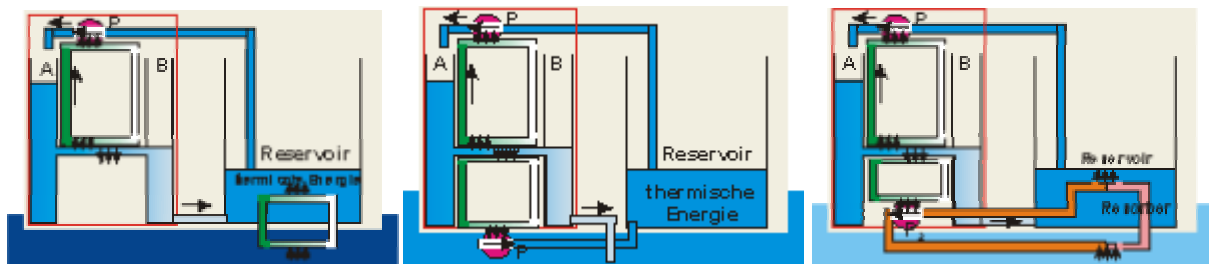


Abbildung 28: Links: Aufnahme von Wärme durch eine Warmwasserheizung, mitte Aufnahme von Warmwasser mittels eines Pumpsystems, rechts: Aufnahme von Wärme gegen den Temperaturgradienten mittels Wärmepumpe. Die unterschiedlichen Farben des Resorbers symbolisieren die Aggregatzustände.

In Abbildung 28 links verbindet ein thermischer Kreisprozess das Reservoir mit der Umgebung und transportiert nach dem Prinzip der Schwerkraftheizung Wärmeenergie in das Reservoir. Dazu muss die Temperatur der Umgebung höher sein als die Systemtemperatur. Der Transport erfolgt zwar gegen die hydrodynamische Potentialdifferenz, nicht aber gegen die thermische.

Ist die Umgebungstemperatur dagegen nicht höher als die Systemtemperatur, kann durch eine durch das System selbst angetriebene Pumpe warmes Wasser in das Reservoir gepumpt werden (Abbildung 28 mitte). Auf diese Weise kann Warmwasser auch gegen das hydrodynamische Potentialgefälle aufgenommen werden, nicht aber gegen ein thermisches Potentialgefälle.

Eine Aufnahme von Wärme gegen das Temperaturgefälle erfordert eine weitere Ergänzung der funktionellen Ausstattung des autonomen Systems. Die den thermischen Kreis (Abbildung 28 links) bewegend Dichteänderungen werden zu Zustandsänderungen weitergeführt, die dem Carnotschen Kreis zugrunde liegen und einen Wärmetransport gegen einen Temperaturgradienten ermöglichen, wie dies beispielsweise bei einem Kühlschrank realisiert ist (Abbildung 28 rechts).

Diese Konstrukte machen deutlich, dass die in Thermodynamik übliche Terminologie nicht ausreicht, um die dargestellten möglichen Formen nicht isolierter autonomer Systeme zu beschreiben und zu bezeichnen. In der Sprache der Thermodynamik stehen nur die Kategorien "offen" und "nichtoffen" ("isoliert") zur Unterscheidung verschiedener Typen thermodynamischer System zur Verfügung. Diese Termini erfassen aber nur Prozesse, die in Richtung eines Potentialgefälles, "bergab" verlaufen. Entgegengesetzt, "bergauf" verlaufende Prozesse sind in diesem Kategoriensystem nicht vorgesehen. (Die gelegentlich anzutreffende Differenzierung der nichtoffenen Systeme in "geschlossene" und "abgeschlossene" hilft hier auch nicht weiter.)

Neben offenen und nichtoffenen thermodynamischen Systemen muss also eine weitere Kategorie geschaffen werden. Ich schlage dafür die Bezeichnung "**aktiv**" vor. **Aktive thermodynamische Systeme sind autonome thermodynamische Systeme, die Stoffe und Energie gegen eine Potentialdifferenz zur Umgebung aufnehmen können.** Die

funktionelle Komponente, die das bewirkt, nenne ich **"Resorber"**. In einem Resorber erfolgt der Wärmeaustausch nicht durch Veränderungen der Temperatur, sondern durch eine Veränderung des Aggregatzustandes, z.B. durch Verdampfen und Kondensieren. Vorgänge dieser Art können auch thermodynamisch gegen den Temperaturgradienten verlaufen. Zur Bewegung des Energieträgers ist dabei eine Pumpe erforderlich, da die Schwerkraft hier nicht wirksam werden kann. Der Antrieb dieser Pumpe kann wieder durch das System selbst erfolgen (Abbildung 28 rechts).

Ein thermodynamischer Körper kann nur isoliert sein, wenn zu seiner Umgebung keine Potentialdifferenzen bestehen. Besteht eine Potentialdifferenz, kann diese nur durch eine undurchlässige Wand aufrecht erhalten werden. Wird diese Wand entfernt, wird der Körper zur Komponente eines thermodynamischen Systems, das spontan, autonom einem Gleichgewichtszustand zustrebt. Dieser Prozess ist das thermodynamische System, das unaufhörlich seinem Ende, dem thermodynamischen Gleichgewicht zustrebt.

Das System, d.h. also der Prozess, kann nur als Fließgleichgewicht erhalten werden, indem die Potentialdifferenz durch Zufluss und Abfluss aufrecht erhalten wird. Sobald Zufluss oder Abfluss verschlossen werden, hört der Prozess auf, das System zerfällt. Ein elementares System kann also nur als offenes System gedacht werden. Der Ausdruck "geschlossenes System" ist also ein Widerspruch in sich (). Erst mit der funktionellen Ausstattung des autonomen Systems kann sich das Fließgleichgewicht (zeitweilig) auch im Zustand der thermodynamischen Isolation erhalten.

Diese Isolation des autonomen Systems ist nicht durch eine äußere Wand bedingt, sondern durch seine funktionelle Organisation, die zu seiner (zeitweiligen) Erhaltung keine funktionellen Komponenten aufweist, die zur Herstellung thermodynamischer Beziehungen zur Umgebung geeignet sind. Die dauerhafte Erhaltung des autonomen Systems erfordert deshalb spezifische funktionelle Komponenten. Einige Möglichkeiten dazu wurden hier erörtert.

Das aktive System (Abbildung 28) stellt in der Reihe der entwickelten Konstrukte eine neue Qualität dar, denn es überschreitet eine thermodynamische Grenze. Nur dieses autonome System kann dauerhaft in einer Umgebung existieren, in der sowohl das hydrodynamische Potential als auch das thermische Potential kleiner sind als das Systempotential. Das aktive System kann also gegen die Umgebung agieren. Eine weitere Analyse der Besonderheiten der aktiven autonomen Systeme werde ich später vornehmen.

11. Lebende Systeme

Das bisher konstruierte kinetische autonome hydrodynamische System ist also (nachdem es gestartet wurde) zu einer zielstrebigem Bewegung aus eigenem Antrieb fähig. Es zeigt also Merkmale, die gewöhnlich nur lebenden Systemen zugeschrieben werden. Warum also sollte ein solches System nicht als "lebendes System, als „hydraulisches Lebewesen“ bezeichnet werden?

Betrachten wir dazu ein ganz einfaches lebendes System, beispielsweise eine Bakterienzelle (Abbildung 29).

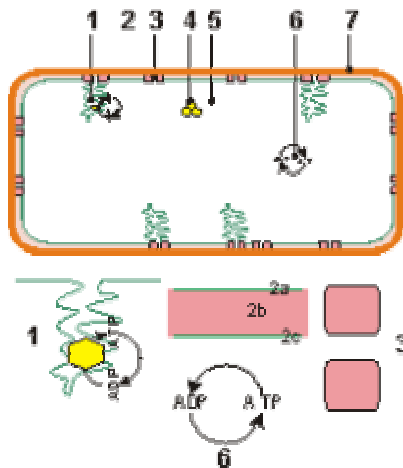


Abbildung 29: Minimalausstattung einer hypothetischen Urzelle

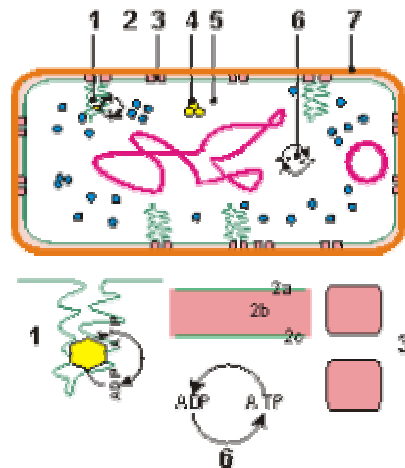


Abbildung:30 Standardausstattung einer rezenten Bakterienzelle (rot DNA, blau Ribosomen))

Wir finden alle funktionellen Komponenten, die auch zur Minimalausstattung des autonomen Systems gehören:

- **Die sinngiebende Komponente (1)**

Ausstülpungen der Zellmembran (Mesosomen), in welchen der Abbau energiereicher Substanzen (z.B. Glucose zu Kohlendioxid und Wasser) erfolgt. Dieser Prozess, die **Dissimilation**, ist exotherm, die frei werdende Energie wird in den ADP - ATP Kreisprozess übertragen. Das energiereiche ATP diffundiert durch die Zelle und steht überall als Energieträger zur Verfügung.

- **Die Membran (2)**

Die Membran ist eine Phase (2b) mit zwei Phasengrenzen, nach außen (2a) und nach innen (2c). Sie isoliert das Zellinnere gegen die Umgebung und ist durch Kanäle perforiert, durch die das Reservoir mit der Umgebung verbunden ist.

- **Kanal mit Pumpe (3)**

Die Kanäle der Membran gewährleisten den Zufluss energiereicher Edukte und den Abfluss energiearmer Produkte, die das chemische Gleichgewicht der Mesosomen. Wenn die Potentialdifferenz zwischen Zelle und Umgebung Diffusion oder Osmose nicht zulassen, sorgen Pumpen (Transporteiproteine, Carrier) für den Transport gegen das Potentialgefälle. Dabei nutzen sie die Energie von ATP.

- **Das Reservoir (4, 5)**

Das Zellplasma stellt das Reservoir dar, in dem die energiereichen Edukte und die energiearmen Produkte gelöst oder kristallin vorliegen.

- **Den energetischen Kreisprozess (6)**

Der energetische Kreisprozess wird durch die Umwandlung von ADP in ATP und dessen Abbau zu ADP realisiert (Abbildung 31).

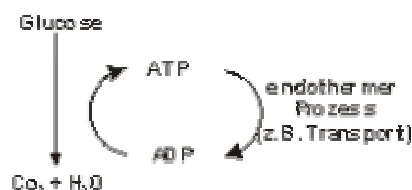


Abbildung 31: Übertragung von Energie durch ATP - ADP

- **Die Wand**

Wie beim technischen System ist die **Zellwand** eine kontingente Komponente. Auch bei den einfachsten rezenten Zellen finden wir darüber hinaus eine Reihe weiterer funktioneller Komponenten, die weiteren Stufen der technischen Konstruktionen entsprechen:

- **Kinetische Komponenten**

Der **Flagellenmotor mit Geißel** ist die eine verbreite funktionelle Komponente, die der Fortbewegung von Bakterien dient.

- **Steuerkomponenten**

Der Flagellenmotor wird durch Moleküle gesteuert, die nach dem Prinzip der stabilen Systeme und der sensorischen Systeme arbeiten. Sie werden in einschlägigen Lehrbüchern beschrieben.

Daneben finden wir bei allen Zellen weitere funktionelle Komponenten, die nicht unmittelbar der Erhaltung der Zelle dienen. Es sind dies die **DNA** und die **Ribosomen**. Die Funktion dieser Komponenten ist die **Autopoiesie** (Selbstorganisation) und das **natürliche Driften** durch **Fortpflanzung**.

Diese Funktionen wurden bei der Konstruktion der technischen Systeme vom Designer wahrgenommen. Lebende Systeme besitzen dagegen funktionelle Komponente, die sie zum Autodesign befähigen. Die Annahme eines außernatürlichen, metaphysischen "intelligenten Designers" ist zur Erklärung der Erhaltung und Entwicklung lebender Systeme nicht erforderlich.

Bleibt noch die Frage nach dem Starter, der auch die autonomen technischen Systeme in Gang setzen muss. Bei allen heute lebenden Systemen sind die Eltern die Starter. Heute entsteht Leben nur aus Leben. Heute entsteht Leben nicht von selbst. Damit stellt sich die Frage nach dem Ursprung des Lebens. Können Lebewesen von allein, durch "Urzeugung" entstanden sein?

Die aktuelle Theorie der Biogenese konzentriert sich vorwiegend auf die Frage, wie die Strukturen entstanden sind, welche die Träger der Funktionen des Lebendigen sind. Die Frage nach dem Start des Lebens wird weniger intensiv diskutiert.

Leben wird üblicherweise *ad hoc* durch die Angabe eines Sets von Merkmalen definiert, die alle zusammen gegeben sein müssen, wenn ein System als "lebend" bezeichnet werden soll. Wenn dieses Set durch Urzeugung entstanden sein soll, dann erhebt sich die Frage nach dem Zeitpunkt, an dem es zu leben beginnt, an dem es startet.

Im Kapitel "Biogenese" der "Theoretischen Anthropologie" und in diesem Projekt habe ich eine Lösung dieser Frage versucht.

Natürliche autonome Systeme müssen sich durch die Fähigkeit zum Autostart und zum Autodesign auszeichnen. Nur sie sollten als "lebend" bezeichnet werden. Die Besonderheit dieser natürlichen autonomen Systeme, der Lebewesen, rechtfertigt die Einführung einer besonderen Terminologie. Ich schlage vor, nur sie als "**Subjekte**" zu bezeichnen.