

Der flatterhafte Falter der Chaosphysik

- Anmerkungen zum Schmetterlingseffekt

H. Joachim Schlichting

*Kann der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien
einen Tornado in Texas auslösen? [1]*

Edward Lorenz

Physikalische Effekte

Der Weg der neuzeitlichen Physik ist mit Effekten gepflastert: der Doppler -, der Compton -, der Barkhausen- , der Mößbauer -, der Faraday- Effekt, und neuerdings der Schmetterlingseffekt. Dieser unterscheidet sich von jenen nicht nur dadurch, daß er keinem großen Physiker, sondern einem kleinen empfindlichen Tier zugeordnet wird. Außerdem entzieht er sich der physikalischen Bestimmung und steht für das, was wir trotz der Kleinheit nicht zu beherrschen vermögen. Damit ist er nicht nur auf die Naturwissenschaften beschränkt. Man kann sogar umgekehrt feststellen, daß der Schmetterlingseffekt in der einen oder anderen Variante lange bevor er im Rahmen der Nichtlinearen Physik wissenschaftlich salonfähig wurde, in den verschiedensten Bereichen, der Philosophie, der Literatur usw. diskutiert wurde.

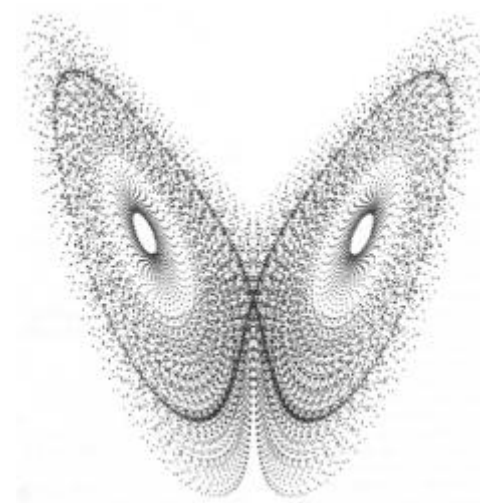


Bild 1: Der Lorenzattraktor als Schmetterling

Kleine Ursachen- große Wirkungen

Der Schmetterlingseffekt ist durch den Titel eines Vortrag des Meteorologen Edward Lorenz im Jahre 1972 schlagartig bekannt und berühmt geworden [1]. Mit seiner Entstehungsgeschichte demonstriert er auf autologische Weise genau das, was er bezeichnet: Eine kleine Ursache ruft eine große Wirkung hervor. Dabei war es gar nicht Lorenz selbst, der den „sensitiven“ Titel gewählt hatte, sondern sein Kollege, Philip Merilees, der als Organisator der Sitzung einer Tagung, auf der Lorenz über die Sensitivität nichtlinearer Systeme sprechen sollte, nicht mehr die Zeit hatte, Lorenz rechtzeitig von seiner eigenmächtigen Titelgebung zu unterrichten. Fortan wurde der Schmetterlingseffekt zum Signum der Chaosforschung und wirkte als willkommenes Thema der Massenmedien über den engen Bereich der Spezialisten hinaus bis in den Alltag der Menschen. Der Häufigkeit, mit der Lorenzsche Titel zitiert wird, entspricht die Ungenauigkeit, mit der dies geschieht. Nicht nur der Ort, an dem der Schmetterling mit den Flügeln schlägt, auch der Ort, an dem dadurch das

Unheil angerichtet wird, variieren von einigen Häufungen (Rio, China, Australien usw.) abgesehen fast beliebig. Ja, selbst der Tornado entpuppt sich manchmal als Gewitter, Überschwemmung oder ein anderes Unwetter, und der Schmetterling mutiert zur Libelle [2].

Worin liegt die Wirkmächtigkeit des Schmetterlingseffekts? Ist es der schöne Falter? Ist es die äußere Ähnlichkeit des Lorenzattraktors mit einem Schmetterling (Bild 1)? Oder liegt es an der Situation, in der die lange im Untergrund virulente neue Sehweise der Physik zum Durchbruch gelangt? Die Antwort darauf dürfte ebenso schwierig sein, wie die auf die Lorenzsche Frage.

Sensitive Probleme

Betrachten wir zunächst den Effekt unabhängig vom Schmetterling, so stellen wir fest, daß er in einer seiner populären Formulierungen auf die sehr allgemeine Aussage reduziert werden kann, eine kleine Ursache könne eine große Wirkung hervorrufen. Die darin niedergelegte Erfahrung ist insofern nicht neu, als sie in den ver-

schiedensten Kontexten, insbesondere in der Literatur, immer wieder zum Ausdruck gebracht wurde und wird (siehe: Kasten). Dabei ist einerseits interessant, daß bereits zu einer Zeit, als der Sachverhalt noch nicht Eingang in die Physik gefunden hatte, zuweilen physikalische Metaphern zur Erläuterung herangezogen werden, die jedoch ganz andere Bereiche betrafen als den erst noch zu begründenden Bereich der nichtlinearen Physik.

Sehr geringe Unterschiede begründen manchmal sehr große Verschiedenheiten (Marie von Ebner- Eschenbach).

Jede Ursache der Dinge ist klein (Cicero)

...daß sie (die Vorhersagen, HJS) allesamt und jederzeit durch einen minimalen Faktor x, der die Fulguration auslöst, über den Haufen geworfen werden können (Hans Magnus Enzensberger)

Die Unterschiede mögen gering sein, aber sie können grundlegend andersartige Auswirkungen haben, wie die Zungen einer Weiche (Primo Levi)

Die größten Dinge in der Welt werden durch andere zuwege gebracht, die wir nichts achten, kleine Ursachen, die wir übersehen, und die sich endlich häufen (Georg Christoph Lichtenberg).

Den Wetterweisen muß der Mut nicht wenig bei der Betrachtung sinken, daß ein Funke eine ganze Stadt in die Asche legen kann, unsere Witterungs- Begebenheiten können ja öfters eben so entstehen, wer will das alles schätzen (Georg Christoph Lichtenberg).

Das Geringste bewirkt das Meiste, die Ordnung entsteht aus der Unordnung (Paul Valéry)

Nur das allein zählt, was sich unendlich, unbestimmt der ANALYSE entzieht- dieses Nichts, dieser Rest, diese äußerste Dezimale (Paul Valéry)

...man wird sich wundern, daß dieser kleine Zufall für alle Ewigkeit über sein Schicksal entscheiden sollte...Die Ursache ist winzig, der Effekt gewaltig; sie ist unendlich klein, er unendlich groß; sie ist zufallsbedingt, er notwendig (Michel Serres).

Das Wort wird souverain und springt aus dem Satz hinaus, der Satz greift über und verdunkelt den Sinn der Seite, die Seite gewinnt Leben auf Unkosten des Ganzen- das Ganze ist kein Ganzes mehr (Friedrich Nietzsche).

Kasten: Einige Zitate aus Literatur und Philosophie

Ein sehr eindrucksvolles Beispiel findet sich in der Erzählung von Heinrich von Kleist in seiner Erzählung: *Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden*. Es geht dabei um eine Art Rekonstruktion der Auslösung der französischen Revolution, die Kleist hier in der kaum merklichen, wie der Flügelschlag eines Schmetterlings zuckenden Oberlippe eines innerlich erregten Menschen sieht: „Vielleicht, daß es auf diese Art zuletzt das Zucken einer Oberlippe war, oder ein zweideutiges Spiel an der Manschette, was in Frankreich den Umsturz der Ordnung der Dinge bewirkte?“ Er erkennt damit, daß in sensitiven, revolutionären oder wie auch immer zu bezeichnenden instabilen Situationen kleinste Schwankungen das normale Geschehen in eine völlig neue Bahn lenken können. Indem er die Aussage in eine Frage kleidet und eine alternative aber ebenso unscheinbare (Er-) Regung benennt, ist er sich bewußt, daß die „wahre“ Ursache niemals mit Sicherheit benannt werden kann. Sehr eindrucksvoll versucht er die Dramatik der nach der Auslösung eskalierenden Situation zu erfassen: „Mir fällt jener »Donnerkeil« des Mirabeau ein, mit welchem er den Zeremonienmeister abfertigte, der nach Aufhebung der letzten monarchischen Sitzung des Königs am 23. Juni, in welcher dieser den Ständen auseinanderzugehen anbefohlen hatte, in den Sitzungssaal, in welchem die Stände noch verweilten, zurückkehrte, und sie befragte, ob sie den Befehl des Königs vernommen hätten? »Ja«, antwortete Mirabeau, »wir haben des

Königs Befehl vernommen« - ich bin gewiß, daß er bei diesem humanen Anfang, noch nicht an die Bajonette dachte, mit welchen er schloß: »ja, mein Herr«, wiederholte er, »wir haben ihn vernommen« - man sieht, daß er noch gar nicht recht weiß, was er will. »Doch was berechtigt Sie« - fuhr er fort, und nun plötzlich geht ihm ein Quell ungeheurer Vorstellungen auf - »uns hier Befehle anzudeuten? Wir sind die Repräsentanten der Nation.« - Das war es was er brauchte! »Die Nation gibt Befehle und empfängt keine« - um sich gleich auf den Gipfel der Vermessenheit zu schwingen. »Und damit ich mich Ihnen ganz deutlich erkläre« - und erst jetzt findet er, was den ganzen Widerstand, zu welchem seine Seele gerüstet dasteht, ausdrückt: »so sagen Sie Ihrem Könige, daß wir unsre Plätze anders nicht, als auf die Gewalt der Bajonette verlassen werden.« - Worauf er sich, selbst zufrieden, auf einen Stuhl niedersetzte. Jetzt kommt der Versuch einer Präzisierung des Geschehens durch Rückgriff auf eine Metaphorik, die mit Vorstellungen und Begriffen der zur Zeit Kleists für die aktuelle Forschung bedeutungsvollen Elektrizitätslehre. - Wenn man an den Zeremonienmeister denkt, so kann man sich ihn bei diesem Auftritt nicht anders, als in einem völligen Geistesbankrott vorstellen; nach einem ähnlichen Gesetz, nach welchem in einem Körper, der von dem elektrischen Zustand Null ist, wenn er in eines elektrisierten Körpers Atmosphäre kommt, plötzlich die entgegengesetzte Elektrizität erweckt wird. Und wie in dem elektrisierten dadurch, nach einer Wechselwirkung, der ihm inwohnende Elektrizitätsgrad wieder verstärkt wird, so ging unseres Redners Mut, bei der Vernichtung seines Gegners, zur verwegenen Begeisterung über“ [3]. Wichtig an diesem Beispiel ist auch, daß das System, die französische Nation, durch diese Auslösung ins Chaos gestürzt wurde. Die Situation blieb eine Zeitlang sensitiv, der Schmetterling trieb flatternd weiter sein ebenso argloses wie unheilvolles Spiel.

Der Verwendung physikalischer Metaphern mag von dem Wunsch herrühren, dem so der normalen Erfahrung Widersprechenden eine Art gesetzliche Dignität, den Anklang des Exakten zu verleihen. So findet man manchmal auch metaphorische Bezüge zur Mathematik. In der folgenden Passage von Edgar Allan Poe heißt es: „Denn bezüglich des letzten Teiles einer solchen Vermutung muß man bedenken, daß die kleinste Abweichung in den Grundtatsachen dieser beiden Fälle zu den schlimmsten Irrtümern in der Berechnung Anlaß geben könnte, indem sie die Ströme der Ereignisse von vornherein in abweichende Richtung bringt - wie denn auch in der Arithmetik ein an sich geringfügiger Irrtum durch die verschiedenen Multiplikationen zuletzt zu einem Resultat führen kann, das von dem wirklichen Ereignis erstaunlich weit entfernt ist“ [4].

Schmetterling

WELCH schönes Jenseits
ist in deinen Staub gemalt.
Durch den Flammenkern der Erde,
durch ihre steinerne Schale
wurdest du gereicht,
Abschiedswebe in der Vergänglichkeiten
Maß.

Nelly Sachs

Sensitive Situationen, in denen unerwartete Abweichungen vom normalen Gang auftreten können, spielen sich sehr oft im individuellen Verhalten einzelner Menschen ab. Auch hierfür ein literarisches Beispiel von Luigi Pirandello: „Es war, wohlgemerkt, nicht etwa so, daß ich mich widersetzt hätte, den Weg einzuschlagen, den mein Vater mich wies. Ich schloß alle möglichen Wege ein. Aber auf ihnen weiterschreiten, nein, das konnte ich nicht. Ich blieb bei jedem Schritt stehen, umkreiste zuerst in weitem und dann immer engerem Bogen jedes Steinchen, dem ich auf dem Weg begegnete, und ich wunderte mich sehr, daß die anderen mich überholten, ohne sich um das Steinchen zu kümmern, das für mich inzwischen die Ausmaße eines unüberwindlichen Gebirges angenommen, hatte, ja einer ganzen Welt, in

der ich mich ohne weiteres hätte ansiedeln können“ [5].

Als weitere Beispiele können Waldbrände, die durch kleinste Funken, Lawinen, die durch kleinste Erschütterungen, Dammbrüche, die durch ein Mauselloch ausgelöst werden, herangezogen werden. In allen Fällen wirken die kleinen Ursachen jedoch nur, wenn die Situation sensitiv, also konkret: der Wald äußerst trocken, die Lawine äußerst instabil, der Damm bis zur Spitze vom anstürmenden Wasser bedroht ist.

Nichtlineare Verhältnisse: kausal aber sensitiv

Bei aller Unvorhersehbarkeit der Auslösung von großen Ereignissen, geht man jedoch meistens davon aus, daß die kausale Grundstruktur des Geschehens nicht verletzt wird. Insbesondere wird zuweilen eine mathematisch-naturwissenschaftliche Metaphorik bemüht, um diese Überzeugung zu illustrieren. So mag es im nachhinein auch gar nicht verwundern, daß der Flügelschlag des Schmetterlings schließlich zu einem physikalischen Effekt wurde.



Bild 2: Die Lorenz- Schmetterling- Attraktoren spielen bei allen unseren Handlungen mit (Bild aus [2]).

Die Verkettung von Ursache und Wirkung, wie sie in der Dynamik eines physikalischen Systems zum Ausdruck kommt, wird üblicherweise durch Differentialgleichungen erfaßt. Diese sind gewissermaßen die mathematische Sprache, in der sich der Determinismus ausdrückt. Im Rahmen der klassischen Physik wird schon aus Gründen der analytischen Berechenbarkeit stets unterstellt, daß Ursache und Wirkung proportional zueinander seien, was sich in der Linearität der Differentialgleichung ausdrückt. Die ebenso frappierende wie überzeugende Konsequenz der Linearität ist, daß man das Verhalten eines Systems nur zu einem bestimmten Zeitpunkt zu kennen braucht, um es für alle Zeiten zu kennen. Ein kleiner Fehler in der Bestimmung der Anfangsbedingungen hat auch nur einen kleinen Fehler in der Vorhersage zur Folge und kann durch Verkleinerung des Fehlers beliebig klein gemacht werden. [6].

Dies Beschränkung auf lineare Differentialgleichungen wurde jedoch fragwürdig, als man endlich zur Kenntnis nehmen mußte, daß durch die Linearisierung oft entscheidende Charakteristika der Dynamik beseitigt wurden, und man nichtlineare Zusammenhänge in den Blick zu nehmen hatte. Unter nichtlinearen Verhältnissen kann ein System sensitiv werden mit der Konsequenz, daß streng unendliche Präzision notwendig wäre, um das Verhalten des Systems vorhersagen zu können. In einem solchen Fall wäre es völlig „unnützlich, die Genauigkeit zu vergrößern oder sie sogar zum Unendlichen tendieren zu lassen, es bleibt bei gänzlicher Ungewißheit, sie verringert sich nicht in dem Maße, in dem die Genauigkeit zunimmt ... Um beispielsweise die Zeit, innerhalb derer die Entwicklung eines Systems vorhersagbar bleibt, zu verzehnfachen,

müßten wir die Genauigkeit der Angabe der Anfangsbedingungen um den Faktor $\exp(10)$ steigern“ ([8], S. 109). Mit anderen Worten: Der *Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien* kann *einen Tornado in Texas auslösen*“. Prigogine nennt sensitive Situationen, in denen der Schmetterlingseffekt zum bestimmenden Prinzip werden kann *instabil*, eine Bezeichnung, die in vielen Situationen, etwa der von Kleist beschriebenen Auslösung der französischen Revolution unmittelbar einleuchtet. „*Instabilität bedeutet..., daß Fluktuationen möglicherweise kein bloßes "Rauschen" mehr sind, sondern die globale Entwicklung des Systems bestimmen. Ereignisse können infolgedessen nicht mehr auf ein regelmäßiges, reproduzierbares Verhalten reduziert werden. Damit kommt ein narratives Element in die Physik. Was wir weit vom Gleichgewicht als "Ursache" der Entwicklung zu erkennen vermögen, hängt von den Umständen ab. Ein und dasselbe Ereignis, ein und dieselbe Fluktuation können völlig vernachlässigbar sein, wenn das System stabil ist, und ganz wesentlich werden, wenn das System durch Nichtgleichgewichts- Zwänge in einen instabilen Zustand getrieben wird*“ ([8], S. 93).

Zur Bedeutung des Schmetterlingseffekts

Der Schmetterlingseffekt ist nicht nur eine unangenehme Begleiterscheinung der Nichtlinearität, die uns selbst im Rahmen deterministischer Verhältnisse ins Chaos führen kann, sie ist die wesentliche Voraussetzung dafür, daß Neues eintreten, echte Evolution ablaufen kann.

So weist Ilya Prigogine darauf hin, „*daß bestimmte Ereignisse imstande sein müssen, den Verlauf der Evolution zu verändern. Anders gesagt: Die Evolution muß instabil sein, sie muß Mechanismen aufweisen, die imstande sind, bestimmte Ereignisse zum Ausgangspunkt einer neuen Entwicklung, einer neuen globalen Kohärenz zu machen*“ ([8], S. 75).

Auf die Notwendigkeit der Abweichung vom deterministisch fixierten Gang der Dinge weist schon Lukrez in seinem eindrucksvollen Lehrgedicht *De rerum natura* hin, in dem er das *Clinamen* beschreibt, jene kleine akasale Abweichung, mit der Epikur den gordischen Knoten des Determinismus zu durchschlagen versuchte:

„*Wenn die Atome sich im leeren Raum durch ihr eigenes Gewicht geradlinig abwärts bewegen, so weichen sie zu ganz unbestimmten Zeitpunkten und an ganz unbestimmten Orten ein wenig von ihrer Richtung ab, so daß du es noch gerade als Bewegungs- änderung bezeichnen kannst. Denn wären sie nicht imstande abzuschweifen, so fielen sie alle abwärts wie Regentropfen durch die unermessliche Leere, ohne daß sie aufeinandertreffen, und kein Zusammenstoß eintritt: so könnte die Natur nie etwas erschaffen*“ [9].

Denn – so in unsern Tagen Michel Serres auf Lukrez bezogen - ohne das *Clinamen* gäbe „*es nur die Gesetze des Schicksals, das heißt die Ketten der Ordnung. Das Neue wird aus dem Alten geboren, das Neue ist nichts als das immer wiederholte Alte. (Das Clinamen)... unterbricht die stoische Kette, es zerbricht die FOEDERA FATI, die unendliche Folge der Gründe und der Ursachen. Er stört gerade die Naturgesetze. Daher das Auftreten der Lebewesen, von allem, was atmet, und die Pferde stürmen los*“ [10].

Zur Schmetterlingsmetaphorik

Kommen wir zum Schluß noch einmal zum Schmetterlingseffekt in der Lorenzschen Version zurück. Interessanterweise ist die zweite Hälfte des Satzes bereits von einem der Begründer der Chaosphysik, Henri Poincaré, im Jahre 1908 in seinem populärwissenschaftlichen Werk *La science et l'hypothèse* formuliert worden: „Nur zehn Grad mehr oder weniger an irgendeiner Stelle ...und ein Zyklon bricht hier und nicht dort aus“. Doch wieviel eindrucksvoller hört sich der Satz an, wenn statt der abstrakter „zehn Grad“ ein kleiner zerbrechlicher Schmetterling steht [11].

Aber auch der Schmetterling im ersten Halbsatz ist keine Erfindung unserer Tage. Schon Denis Diderot, der sich insbesondere mit den Implikationen eines strengen Determinismus auseinandersetzt, wie er in der klassischen Physik zugrunde gelegt wird, stellt die Frage: "Glauben Sie denn wahrhaft, daß das Ausschlagen eines Pferdes auf dem Lande in Frankreich den Flug eines Schmetterlings auf den Sonde-Inseln verwirrt?" [12]. Aber die Frage hier eher als eine In- Fragestellung des Schmetterlingseffekts gemeint. Diderots Beispiel für den Schmetterlingseffekt sieht anders, konkreter und unmittelbarer aus: „Man hat früher das Vergnügen satt, das man nur auf dem First eines Daches hat in der ständigen Gefahr, sich bei der geringsten Bewegung den Hals zu brechen“ [13].

In der Literatur versucht man auch die Entwicklung einzufangen, die durch den schlagenden Schmetterlingsflügel in Gang gesetzt wird, ohne daß dies in den makroskopischen Auswirkungen bereits sichtbar geworden wäre. Auch wenn in dem folgenden Zitat dazu der Schmetterling durch eine ebenso schöne Libelle ersetzt wird, dürfte dasselbe gemeint sein: „Das Gesumme des Autos verlor sich schon wesenlos hinter den Bergen; die

Landschaft döste in der Dämmerung; die Wolken lagen wie eine Schieferplatte darüber. Und dennoch! Etwas schien sich ereignet zu haben. Irgend etwas hatte ihn gestreift, flüchtig wie der Flügel einer Libelle, und das rieselte nun von der Schädeldecke, rieselte über die Schultern die Arme hinunter und an den Fingerspitzen von ihm ab“ [14].

Interessanterweise wird der Schmetterling auch noch in weiterer Hinsicht metaphorisch ausgebeutet. Hier nur einige Hinweise: Für den Maler Max Ernst steht der Schmetterlingsflügel für das Unscheinbar Kleine, das dem Übermächtig Großen in Form eines Sternhaufens gegenübergestellt wird: „Es genügt nicht mehr, in der Landschaft den Wiederhall einer Stimmung zu empfinden. Wir sehen weiter. In größeren Zusammenhängen: Flugzeugblick. Wir sehen andererseits *schärfer*. Das Mikroskop, der Röntgenapparat haben uns eine neue Sichtbarkeit geschaffen. Die ungeheure Welt der anonymen und abstrakten Dinge, das ganze Reich des Amorphen wird in den Kreis unseres Erlebens mit einbezogen. Die Gefühlsspanne wird größer. Es entstehen Zusammenhänge zwischen einem Sternhaufen und einem Schmetterlingsflügel unter dem Mikroskop“[15].

Fazit

Der Schmetterlingseffekt ist nicht neu. Im Rahmen der nichtlinearen Physik hat er jedoch neue Aktualität erlangt, die uns veranlaßt, auf längst vergessene Spuren hinzuweisen. So groß aber auch die Wirkungen sein mögen, die von dem flatterhaften Falter ausgehen, so unfäßbar und unbestimmbar bleibt er auch aus der exakten physikalischen Perspektive. Er flattert gewissermaßen nur im Konjunktiv. Schließlich sollte man sich folgende Aussagen vor Augen halten, die Edward Lorenz zu Beginn seines berühmten Vortrages machte:

1. Wenn ein einziger Flügelschlag eines Schmetterlings die Auslösung eines Tornados zur Folge haben kann, so gilt dies ebenso für alle vorhergehenden und folgenden Flügelschläge so wie für die von Millionen anderer Schmetterlinge ohne zu sprechen von den unzähligen viel stärkeren Lebewesen, insbesondere unserer eigenen Spezies.
2. Wenn der Flügelschlag eines Schmetterlings einen Tornado auslösen kann, so kann er auch den Effekt haben, ihn zu verhindern [1].

Literatur

- [1] Lorenz, Edward, in: Edward Lorenz: The Essence of Chaos. Seattle: University of Washington Press 1993 (übersetzt von HJS).
- [2] Witkowski, Nicolas: La chasse à l'effet papillon. Alliage 22 (1995), p. 46f.
- [3] Kleist, Heinrich v.: Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden. Sämtliche Werke und Briefe. München: Hanser 1961, S.321+
- [4] Poe, Edgar Allan: Das Geheimnis von Marie Rogets Tod. In: ders.Phantastische Geschichten. München: Borowsky, S. 379.
- [5] Pirandello, Luigi: Einer, keiner hunderttausend. Mindelheim: Sachon, S. 9.
- [6] Schlichting, H. Joachim: Naturwissenschaften - zwischen Zufall und Notwendigkeit. Praxis der Naturwissenschaften-Physik 42/1, 35, (1993).
- [7] Prigogine, Ilya; Stengers, Isabelle; Pahaut, Serge: Die Dynamik von Leibniz zu Lukrez. In: I. Prigogine, I. Stengers, S. Pahaut, M. Serres: Anfänge. Berlin: Merve, S.54.
- [8] Prigogine, Ilya; Stengers, Isabelle: Das Paradox der Zeit- Zeit, Chaos und Quanten. München, Piper 1993.
- [9] Lukrez, Titus: De rerum natura II, 216-224 (übersetzt von S. Samburski).
- [10] Serres, Michel: La naissance de la physique dans le texte de Lucrèce. Fleuves et turbulences. Paris: Éditions de Minuit 1977, p 136; (übersetzt von HJS).+
- [11] Poincaré, Henri: z.n. [2].
- [12] Diderot, Denis: Principes philosophique sur la matière et le mouvement. Zitiert nach: Bachelard, Gaston: Epistemologie. Frankfurt: Fischer 1993, S.166.
- [13] Diderot, Denis: Jacques le fataliste et son maître. Paris: Gallimard 1973, p. 231 (übersetzt von HJS).