

VL: Prof. Dr. Harald Engel  
UE: Dr. Jan F. Tötz

## Projekte zur Statistischen Physik des Nichtgleichgewichts

### Durchführung

Die Projekte stellen Aufgaben aus aktuellen Forschungsfeldern der Statistischen Physik des Nichtgleichgewichts dar und können nach eigenen Vorstellungen bearbeitet werden (Numerik, Analytik, Zusammenfassung der Literatur ...). Die in jeder Projektbeschreibung aufgeführten Punkte können als Leitfaden dienen, Sie können aber auch in Absprache mit den Betreuern eigene Ideen verfolgen.

Die Projekte sind so konzipiert, dass die Bearbeitung mit der angegebenen Literatur und dem Wissen aus der Vorlesung möglich ist. Bei einigen Projekten werden allerdings besondere Vorkenntnisse benötigt (z.B. MATHEMATICA, PYTHON, MATLAB, ...).

Zur vollständigen Bearbeitung gehören folgende Punkte:

1. Bearbeitung des Projekts in Gruppen von maximal 3 Studierenden.
2. Präsentation der Ergebnisse in einem 15 minütigen Kurzvortrag (+ 5 Minuten Diskussion) in der letzten Vorlesungswoche am 18./19. Juli 2018. Wichtig ist hierbei in erster Linie die verständliche Darstellung. Beschränken Sie sich deshalb auf die zum Verständnis wesentlichen Punkte.
3. Abgabe einer schriftlichen Ausarbeitung mit vollständiger Dokumentation der Lösungswege und vollständigen Quellenangaben bis zum 20.07.2018. Auch hier steht die Verständlichkeit und übersichtliche Darstellung im Vordergrund. Der Umfang der Ausarbeitung soll 5-10 Seiten umfassen.

Während der gesamten Bearbeitungszeit stehen Ihnen die Betreuer des jeweiligen Projektes für Fragen zur Verfügung. Bitte machen Sie individuell Termine mit den Betreuenden aus.

## Projekt 1: *Stochastische Modellierung der Musterbildung in Verkehrsströmen*

**Betreuer:** Harald Engel, h.engel@physik.tu-berlin.de, EW 738

- Perform a literature review about this topic based on the given literature [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] and the material cited therein. What are the fundamental equations and terms?
- Describe the instability of homogeneous traffic flows ("Stau aus dem Nichts")
- Perform a simple simulation with a cellular automaton [1, 5, 6].
- Review current developments and present the applicability of established methods to other self-driven many-particle systems.

### Literature

- [1] R. Mahnke, J. Kaupužs, and I. Lubashevsky. [Probabilistic description of traffic flow](#). *Physics Reports* **408**, 1 (2005)
- [2] J. Hinkel. Applications of Physics of Stochastic Processes to Vehicular Traffic Problems. Ph.D. thesis, Universität Rostock (2007)
- [3] D. Helbing. [Traffic and related self-driven many-particle systems](#). *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001)
- [4] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. [Phenomenological Study of Dynamical Model of Traffic Flow](#). *J. Phys. I France* **5**, 1389 (1995)
- [5] D. E. Wolf. [Cellular automata for traffic simulations](#). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **263**, 438 (1999)
- [6] R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. [Metastable states in cellular automata for traffic flow](#). *Eur. Phys. J. B* **5**, 793 (1998)
- [7] Y. B. Gaididei, C. Gorria, R. Berkemer, P. L. Christiansen, A. Kawamoto, M. P. Sørensen, and J. Starke. [Stochastic control of traffic patterns](#). *Netw. Heterog. Media* **8**, 261 (2013)

## Projekt 2: Entropieabsenkung als Maß für den Ordnungsgrad von Nichtgleichgewichtszuständen

**Betreuer:** Harald Engel, h.engel@physik.tu-berlin.de, EW 738

Am Beispiel der Brown'schen Bewegung nichtlinear dissipativer Oszillatoren (selbsterregte Schwingungen) soll untersucht werden, ob die weiche Anfachung selbsterregter Schwingungen im Zuge einer superkritischen Hopf-Bifurkation in Übereinstimmung mit Klimontovich's S-Theorem mit einer Abnahme der renormierten Shannon-Entropie verbunden ist.

Aufgaben:

- Wie lautet die Aussage des Klimontovich-Theorems [1, 2]?
- Brown'sche Bewegung von Poincaré-Oszillatoren: Ausgangspunkt sind die Langevin-Gleichungen

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \gamma \left( q, \frac{dq}{dt} \right) \frac{dq}{dt} + q = \sqrt{D}\zeta(t) \quad (1)$$

für einen dissipativ-nichtlinearen Oszillator mit der nichtlinearen Reibungscharakteristik

$$\gamma(H) = \frac{1}{2} [(\gamma_0 - \delta) + 2uH], \quad \gamma_0, \delta, u > 0, \quad H = \frac{1}{2}(p^2 + q^2), \quad p := \frac{dq}{dt} \text{ (Poincare-Oszillator)} \quad (2)$$

in Gegenwart von Gauß'schem weißen Rauschen

$$\langle \zeta(t) \rangle = 0, \quad \langle \zeta(t)\zeta(t - \tau) \rangle = \delta(t). \quad (3)$$

- Leiten Sie die Fokker-Planck-Kolmogorov-Gleichung für die Energie der Schwingungen,  $H$ , ab und zeigen Sie, dass ihre stationäre Lösung lautet

$$P^0(H; \delta) = \frac{1}{Z} \exp -\frac{1}{D} [(\gamma_0 - \delta)H + uH^2] \quad (4)$$

- Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Informationsentropie dieser Verteilung

$$S(\delta) = - \int_0^\infty dH P^0(H; \delta) \ln P^0(H; \delta) \quad (5)$$

von der Anregungsstärke  $\delta$ . Stellen Sie dazu  $S(\delta; D)$ ,  $\langle H(\delta, D) \rangle$  sowie  $\delta(D)$  entsprechend  $\langle H \rangle = \text{const}$  grafisch dar. Zeigen Sie, dass gilt

$$\left( \frac{\partial S}{\partial \delta} \right)_D > 0, \quad \left( \frac{\partial S}{\partial \delta} \right)_{\langle H \rangle} < 0 \quad (6)$$

und interpretieren Sie beide Ergebnisse.

- Berechnen Sie die Entropieproduktion als Funktion von  $\delta$  [3].
- Wiederholen Sie die Rechnung für stochastisch erregte van-der-Pol Oszillatoren bei verschiedenen Werten von  $\epsilon$ .

### Literature

- [1] Y. Klimontovich. Statistical Physics. CRC Press (1986)
- [2] Y. L. Klimontovich. [Entropy and information of open systems](#). *Phys.-Usp.* **42**, 375 (1999)
- [3] T. Tomé and M. J. de Oliveira. [Entropy production in irreversible systems described by a Fokker-Planck equation](#). *Phys. Rev. E* **82**, 021120 (2010)

## Projekt 3: Stochastische Resonanz

**Betreuer:** Jan F. Totz, [jantotz@itp.tu-berlin.de](mailto:jantotz@itp.tu-berlin.de), EW 148

The concept of stochastic resonance describes a counterintuitive phenomenon in bistable systems subject to both periodic and random forcing: an increase in the input noise can result in an improvement in the output signal-to-noise ratio. Thus the presence of noise enhances the detection of signals that are otherwise too weak to distinguish. It has been described and observed in a wide variety of biological, chemical and physical systems ranging from neurons to oscillatory chemical reactions and to lasers and SQUIDs [1, 2, 3].

Tasks:

- Perform a literature review about this topic based on the given literature and the material cited therein.
- Write a computer simulation of a particle in a double-well potential subject to periodic driving and a stochastic force.
- Use your simulation to calculate the spectral power-density  $S(\omega)$  and signal-to-noise ratio.
- Compare with known analytic results from the lecture and the literature [4, 5] in regards to signal-to-noise ratio [1], correlation functions [1] and linear response theory for periodically driven stochastic systems [6].
- What are the applications of stochastic resonance in biology [7, 8] and neuroscience [9, 10, 11] or elsewhere? Can noise enhance perception as predicted? Are there applications past 2002?

## Literature

- [1] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni. [Stochastic resonance](#). *Rev. Mod. Phys.* **70**, 223 (1998)
- [2] M. D. McDonnell and D. Abbott. [What Is Stochastic Resonance? Definitions, Misconceptions, Debates, and Its Relevance to Biology](#). *PLOS Comput. Biol.* **5**, e1000348 (2009)
- [3] K. Wiesenfeld and F. Moss. [Stochastic resonance and the benefits of noise: From ice ages to crayfish and SQUIDs](#). *Nature* **373**, 33 (1995)
- [4] B. McNamara and K. Wiesenfeld. [Theory of stochastic resonance](#). *Phys. Rev. A* **39**, 4854 (1989)
- [5] B. McNamara, K. Wiesenfeld, and R. Roy. [Observation of Stochastic Resonance in a Ring Laser](#). *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2626 (1988)
- [6] P. Hänggi and H. Thomas. [Stochastic processes: Time evolution, symmetries and linear response](#). *Physics Reports* **88**, 207 (1982)
- [7] D. F. Russell, L. A. Wilkens, and F. Moss. [Use of behavioural stochastic resonance by paddle fish for feeding](#). *Nature* **402**, 291 (1999)
- [8] P. Hänggi. [Stochastic Resonance in Biology How Noise Can Enhance Detection of Weak Signals and Help Improve Biological Information Processing](#). *ChemPhysChem* **3**, 285 (2002)

- [9] T. Mori and S. Kai. [Noise-Induced Entrainment and Stochastic Resonance in Human Brain Waves](#). *Phys. Rev. Lett.* **88**, 218101 (2002)
- [10] M. Usher and M. Feingold. [Stochastic resonance in the speed of memory retrieval](#). *Biol Cybern* **83**, L011 (2000)
- [11] A. Longtin, A. Bulsara, and F. Moss. [Time-interval sequences in bistable systems and the noise-induced transmission of information by sensory neurons](#). *Phys. Rev. Lett.* **67**, 656 (1991)

## **Projekt 4: Relativistische Brown'sche Bewegung**

**Betreuer:** Jan F. Tetz, [jantetz@itp.tu-berlin.de](mailto:jantetz@itp.tu-berlin.de), EW 148

- Perform a literature review about this topic based on the given literature [1] and the material cited therein.
- Where do relativistic diffusion processes play a role? What problems arise when modelling them? How can they be resolved?
- Perform numerical simulations of non-relativistic and relativistic Brownian motion. Compare the resulting velocity distributions.
- How are temperature and heat defined for relativistically moving bodies? Do they appear hotter or colder? [2, 3]

### **Literature**

[1] J. Dunkel. [Relativ heiß](#). *Phys. J.* (2011)

[2] J. Dunkel and P. Hänggi. [Relativistic Brownian motion](#). *Phys. Rep.* **471**, 1 (2009)

[3] J. Dunkel, P. Hänggi, and S. Hilbert. [Non-local observables and lightcone-averaging in relativistic thermodynamics](#). *Nat. Phys.* **5**, 741 (2009)

## Projekt 5: *Oscillator synchronization with common noise*

**Betreuer:** Jan F. Tetz, [jantetz@itp.tu-berlin.de](mailto:jantetz@itp.tu-berlin.de), EW 148

Synchronization of oscillators is a ubiquitous phenomenon in nature, ranging from flashing fireflies, firing neurons, and circadian rhythms in biology to pendula, lasers, and bridge-crossing pedestrians in engineered systems [1]. Counterintuitively noise can lead to synchronization even if the oscillators are repulsively coupled [2, 3].

Tasks:

- Perform a literature review about this topic based on the given literature and the material cited therein.
- Write a computer simulation for an ensemble of Kuramoto phase oscillators under common noise and reproduce the different scenarios presented in the literature [2, 3].
- What is an intuitive picture for synchronization despite noise and repulsive coupling?
- Is it possible to find the effect with real-world chemical oscillators? Perform a numerical simulation with the ZBKE model of the Belousov-Zhabotinsky oscillatory reaction [4, 5].

### Literature

- [1] A. Pikovsky and Y. Maistrenko. [Synchronization - Theory and Application](#). Springer (2003)
- [2] A. V. Pimenova, D. S. Goldobin, M. Rosenblum, and A. Pikovsky. [Interplay of coupling and common noise at the transition to synchrony in oscillator populations](#). *Sci. Rep.* **6**, 38518 (2016)
- [3] D. S. Goldobin, A. V. Pimenova, M. Rosenblum, and A. Pikovsky. [Competing influence of common noise and desynchronizing coupling on synchronization in the Kuramoto-Sakaguchi ensemble](#). *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **226**, 1921 (2017)
- [4] J. F. Tetz. [Synchronization and Waves in Confined Complex Active Media](#). Ph.D. thesis, TU Berlin, Berlin (2017)
- [5] J. F. Tetz, J. Rode, M. R. Tinsley, K. Showalter, and H. Engel. [Spiral wave chimera states in large populations of coupled chemical oscillators](#). *Nat. Phys.* **14**, 282 (2018)