

Abstract

Investigations of nonlinear dynamics in coupled systems have seen a huge increase in interest during the last years. The size of considered systems ranges from a few coupled elements to complex networks, and collective dynamics may arise in various patterns, of which in-phase (or zero-lag) synchronization is the most prominent. Traveling waves and cluster or group synchronization are other examples. For example, during cluster synchronization, parts of a network synchronize with zero lag, but with a nonzero phase-lag between different clusters. The signal transmission between coupled elements is often not instantaneous. Thus non-zero transmission times have to be taken into account as crucial quantities that influence the dynamics of network nodes to a large extent.

Analysis of the underlying structure that forms the backbone of interacting elements is at the heart of network science. This vibrant field of research has received much attention due to the ever-growing amount of empirical data and progress on computational resources. The power of network science arises from the identification of universal properties with applications in many contexts ranging from neuroscience and biology to engineering or social systems. In neuroscience, for instance, progress on imaging techniques allows investigations of the brain with unprecedented spatial resolution and accuracy of the structural and functional networks. In addition to empirical measurements or data acquisition, generic network models have been developed to define characteristic classes of networks such as random or scale-free networks. Recently, complex networks with time-varying topologies have been in the focus of many research activities. In many cases, static or time-aggregate networks are only a rough approximation and the specific sequence of links is of crucial importance.

This is particularly true for a realistic study of contagion dynamics. In the context of spreading infectious diseases, the order of contacts determines, if a transmission can be successful. A disease can only be passed on along time-respecting paths guaranteeing causality. More and more data on networks of various origins have become readily available including social networks, human mobility, and livestock trade. The combination of dynamical models and network science has produced many results relevant for both basic research and applications.

In this cumulative habilitation, I will highlight my contribution to these fields of research and provide a general overview about the respective topics.

Zusammenfassung

Untersuchungen von nichtlinearer Dynamik gekoppelter Systeme haben in den letzten Jahren sehr große Aufmerksamkeit erfahren. Die Größe der betrachteten System variiert dabei von wenigen gekoppelten Elementen bis zu komplexen Netzwerken und kollektive Dynamik resultiert dabei in verschiedenen Mustern, unter denen In-Phasen-Synchronisation eine prominente Spielart ist. Sog. *traveling waves* und Cluster- oder Gruppensynchronisation sind weitere Beispiele. Bei Clustersynchronisation etwa synchronisieren Teile eines Netzwerks ohne Phasenverzug, aber mit einem von Null verschiedenen Verzug zwischen den unterschiedlichen Clustern. Die Signalübertragung zwischen gekoppelten Elementen ist häufig nicht instantan. Daher müssen endliche Übertragungszeiten als wichtige Größen berücksichtigt werden, die die Dynamik der Netzwerkknoten in großem Maße beeinflussen können.

Die Analyse der zugrunde liegenden Strukturen, die das Rückgrat der wechselwirkenden Elemente bilden, steht im Zentrum von *network science*. Dieses höchst aktive Forschungsgebiet hat große Aufmerksamkeit durch die steigende Anzahl von empirischen Datensätzen und den Fortschritt in der Leistungsfähigkeit von Computern erfahren. Die Stärke von *network science* beruht auf der Identifikation universeller Eigenschaften mit Anwendung in vielen Zusammenhängen von Neurowissenschaften und Biologie bis zu Ingenieur- und Sozialwissenschaften. In den Neurowissenschaften erlaubt zum Beispiel der Fortschritt von bildgebenden Verfahren Untersuchungen des Gehirns mit nie gesehener, räumlicher Auflösung und Genauigkeit bezüglich struktureller und funktionaler Netzwerke. Zusätzlich zu empirischen Messungen und Datenerhebung sind Modelle generischer Netzwerke entwickelt worden, um charakteristische Klassen von Netzwerken wie etwa zufällige oder skalenfreie Netzwerke zu definieren. Erst kürzlich sind komplexe Netzwerke mit zeitlich variierenden Topologien ins Zentrum vieler Forschungsaktivitäten gerückt. In vielen Fällen sind statisch oder zeitlich aggregierte Netzwerke nur eine grobe Näherung und die genaue Reihenfolge von Links ist von größter Wichtigkeit.

Dies gilt im Besonderen für realistische Untersuchungen zur Ansteckungsdynamik. In Bezug auf die Übertragung ansteckender Krankheiten legt die Reihenfolge der Kontakt fest, ob eine Übertragung überhaupt möglich ist. Eine Krankheit kann nämlich nur entlang kausaler Pfade weitergegeben werden. Immer mehr Netzwerkdaten aus unterschiedlichen Gebieten ist inzwischen verfügbar wie zum Beispiel soziale Netzwerke, Mobilität und Tierhandel. Die Kombination dynamischer Modelle und *network science* hat zu zahlreichen Ergebnissen geführt, die sowohl für die Grundlagenforschung als auch Anwendungen relevant sind.

In dieser kumulativen Habilitation werde ich Highlights meiner Beiträge zu diesen Forschungsgebieten zusammenfassen und einen allgemeinen Überblick über das jeweilige Gebiet geben.