

DISS. ETH NO. 30259

From Interactions to Persistence: A Multi-Level Perspective on Group Dynamics

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

GEORGES ANDRES

MSc ETH in Physics
ETH Zurich, CH

born on 09.05.1994

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Dr. Frank Schweitzer
Prof. Dr. Dr. Stefan Thurner
Prof. Dr. Samin Aref

2024

Abstract

This dissertation improves our understanding of group dynamics in social systems. Through a quantitative analysis, we shed new light on the interplay between the structure and the dynamics of groups. In particular, we investigate the link between the structure of groups and their ability to persist over time. In this context, structural balance theory is central. It allows us to differentiate favorable, or balanced, from unfavorable, or unbalanced, relational configurations.

The central tenet of this dissertation is that groups in social systems must be modeled from a multi-level perspective, encompassing the micro-, meso-, and macroscopic level. Hence, our analysis spans from dyadic and triadic relations at the microscopic level over to groups at the mesoscopic level and to the system as a whole at the macroscopic level. We employ networks and hypergraphs to model the interdependencies among individuals and groups. Networks capture dyadic relations and interactions involving two individuals. Hypergraphs capture groups and polyadic interactions between multiple individuals.

There are two main challenges to the application of such a multi-level analysis: (i) Across all three levels, components of social systems are interdependent, and (ii) available data mainly relates to interactions among individuals rather than their social relations and groups. To overcome these challenges, we develop a set of data-driven and analytical models. First, we develop methods for inferring positive or negative social relations and social groups using networks and hypergraphs to model interaction data. Second, to model the persistence of groups in time, we provide a method for inferring timescales of dynamical processes in temporal networks. Third, we construct an agent-based model to understand group dynamics analytically.

The models we propose allow us to quantify novel aspects of groups and their dynamics. We find that hypergraph models of group interactions must account for sparsity. When failing to do so, these models have limited practical usability for studying social groups. Moreover, we find that interaction data allows us to infer the positive and negative relations between members of social groups. This enables us to characterize the relational structure of groups based on structural balance. Contradicting our expectations, we find that not all aspects of structural balance are equally beneficial for the persistence of groups. While balance is usually associated with stability, our findings highlight the importance of cohesion over balance. Finally, we find that, by formally

modeling the costs and benefits of belonging to a group, we can replicate the main processes of group dynamics, encompassing the formation, growth, and dissolution of groups.

The scientific contribution of this dissertation is two-fold. First, our multi-level quantitative framework advances the understanding of group dynamics in general and of persistence in social systems in particular. The network and hypergraph models we develop contribute to the study of complex systems beyond the scope of this dissertation. Second, we unlock interaction data for research on the relational structures and the dynamics of groups in social systems. By inferring relations and groups from such data, we provide a new set of tools that enables the study of social systems in a new light and with an unmatched temporal resolution.

Kurzfassung

Diese Dissertation hat als Ziel, unser Verständnis von Gruppendynamiken in sozialen Systemen zu erweitern. Durch eine quantitative Analyse beleuchten wir das Zusammenspiel zwischen der Struktur und der Dynamik von Gruppen. Insbesondere untersuchen wir den Zusammenhang zwischen der Struktur von Gruppen und ihrer Fähigkeit, über die Zeit hinweg zu bestehen. In diesem Kontext spielt die Balancetheorie eine zentrale Rolle. Sie ermöglicht es uns, zwischen vorteilhaften und unvorteilhaften Konfigurationen von sozialen Beziehungen zu unterscheiden.

Der zentrale Grundsatz dieser Dissertation ist, dass Gruppen in sozialen Systemen aus einer mehrstufigen Perspektive modelliert werden müssen. Daher erstreckt sich unsere Analyse von dyadischen und triadischen Beziehungen auf mikroskopischer Ebene über Gruppen auf mesoskopischer Ebene bis hin zum System als Ganzes auf makroskopischer Ebene. Wir verwenden Netzwerke und Hypergraphen, um Abhängigkeiten zwischen Individuen und Gruppen zu modellieren. Netzwerke erfassen dyadische Beziehungen und Interaktionen zwischen zwei Individuen. Hypergraphen, hingegen, erfassen Gruppen und Interaktionen zwischen mehreren Individuen.

Es gibt zwei Herausforderungen bei der Anwendung einer solchen mehrstufigen Analyse: (i) Auf allen drei Ebenen sind die Elemente sozialer Systeme voneinander abhängig, und (ii) verfügbare Daten beschreiben primär Interaktionen zwischen Individuen und nicht deren sozialen Beziehungen und Gruppen. Um diese Herausforderungen zu überwinden, entwickeln wir eine Reihe von datengetriebenen und analytischen Modellen. Erstens entwickeln wir Methoden zur Inferenz positiver oder negativer sozialer Beziehungen und Gruppen, indem wir Netzwerke und Hypergraphen zur Modellierung von Interaktionsdaten verwenden. Zweitens schlagen wir ein Modell zur Inferenz von Zeitskalen dynamischer Prozesse in zeitabhängigen Netzwerken vor, um die Beständigkeit von Gruppen über die Zeit hinweg zu modellieren. Drittens bauen wir ein agentenbasiertes Modell, um Gruppendynamiken analytisch zu verstehen.

Die entwickelten Modelle ermöglichen es uns, neue Aspekte von Gruppen und deren Dynamiken zu quantifizieren. Wir stellen fest, dass Hypergraphmodelle von Gruppeninteraktionen deren Spärlichkeit berücksichtigen müssen. Andernfalls haben diese Modelle eine begrenzte praktische Nutzbarkeit für die Untersuchung sozialer Gruppen. Zudem zeigen wir auf, dass Interaktionsdaten es uns ermöglichen, die positiven und negativen Beziehungen zwischen den Mitgliedern sozialer Gruppen abzuleiten.

Dies ermöglicht es uns, die Beziehungsstruktur von Gruppen basierend auf der Balancetheorie zu charakterisieren. Unsere Resultate weisen darauf hin, dass nicht alle Aspekte des strukturellen Gleichgewichts gleichermaßen vorteilhaft für die Beständigkeit von Gruppen sind. Während Gleichgewicht üblicherweise mit Stabilität assoziiert wird, heben unsere Ergebnisse die Bedeutung von Kohäsion über Gleichgewicht hervor. Letztlich stellen wir fest, dass wir durch die formale Modellierung der Kosten und Nutzen der Zugehörigkeit zu einer Gruppe die Hauptprozesse der Gruppendynamik, einschliesslich der Bildung, des Wachstums und der Auflösung von Gruppen, replizieren können.

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Dissertation ist zweifach. Erstens erweitert unser mehrstufige quantitative Ansatz das Verständnis von Gruppendynamiken im Allgemeinen und von Beständigkeit in sozialen Systemen im Besonderen. Über den Rahmen dieser Dissertation hinaus, tragen die von uns entwickelten Netzwerk- und Hypergraphmodelle zur Untersuchung komplexer Systeme bei. Zweitens erschliessen wir Interaktionsdaten für die Forschung an den Beziehungsstrukturen und der Dynamik von Gruppen in sozialen Systemen. Indem wir Beziehungen und Gruppen aus solchen Daten ableiten, bieten wir ein neues Set von Werkzeugen, das die Untersuchung sozialer Systeme in einem neuen Licht und mit einer beispielloser zeitlichen Auflösung ermöglicht.

Sommaire

Cette dissertation améliore notre compréhension des dynamiques de groupe dans les systèmes sociaux. À travers une analyse quantitative, nous mettons en lumière l'interaction entre la structure et les dynamiques des groupes. En particulier, nous étudions le lien entre la structure des groupes et leur capacité à persister dans le temps. Dans ce contexte, la théorie de l'équilibre structurel joue un rôle central. Elle nous permet de différencier les configurations relationnelles favorables, ou équilibrées, des configurations défavorables, ou déséquilibrées.

Le principe central de cette dissertation est que les groupes dans les systèmes sociaux doivent être modélisés à partir d'une perspective multi-niveaux, englobant les niveaux microscopique, mésoscopique et macroscopique. Par conséquent, notre analyse s'étend des relations dyadiques et triadiques au niveau microscopique, aux groupes au niveau mésoscopique et au système dans son ensemble au niveau macroscopique. Nous utilisons des réseaux et des hypergraphes pour modéliser les interdépendances entre individus et groupes. Les réseaux capturent les relations dyadiques et les interactions impliquant deux individus. Les hypergraphes capturent les groupes et les interactions polyadiques entre plusieurs individus.

L'application d'une telle analyse multi-niveaux présente deux défis principaux : (i) À tous les niveaux, les composants des systèmes sociaux sont interdépendants, et (ii) les données disponibles concernent principalement les interactions entre individus plutôt que leurs relations sociales et leurs groupes. Pour surmonter ces défis, nous développons un ensemble de modèles analytiques se basant sur les données. Premièrement, nous développons des méthodes pour déduire les relations sociales positives ou négatives et les groupes sociaux en utilisant des réseaux et des hypergraphes pour modéliser les données d'interaction. Deuxièmement, pour modéliser la persistance des groupes dans le temps, nous proposons une méthode pour déduire les échelles de temps des processus dynamiques dans les réseaux temporels. Troisièmement, nous construisons un modèle analytique pour comprendre les dynamiques de groupe.

Les modèles que nous proposons nous permettent de quantifier de nouveaux aspects des groupes et de leurs dynamiques. Nous constatons que les modèles d'hypergraphe des interactions de groupe doivent tenir compte de la parcimonie des données. Si ce n'est pas le cas, ces modèles ont une utilité pratique limitée pour l'étude des groupes sociaux. De plus, nous trouvons que les données d'interaction nous permettent de

déduire les relations positives et négatives entre les membres des groupes sociaux. Cela nous permet de caractériser la structure relationnelle des groupes en fonction de l'équilibre structurel. Contrairement à nos attentes, nous constatons que tous les aspects de l'équilibre structurel ne sont pas également bénéfiques pour la persistance des groupes. Alors que l'équilibre est généralement associé à la stabilité, nos résultats soulignent l'importance de la cohésion plutôt que l'équilibre. Enfin, nous découvrons qu'en modélisant formellement les coûts et les avantages de l'appartenance à un groupe, nous pouvons reproduire les principaux processus des dynamiques de groupe, y compris la formation, la croissance et la dissolution des groupes.

La contribution scientifique de cette dissertation est double. Premièrement, notre cadre quantitatif multi-niveaux fait progresser la compréhension des dynamiques de groupe en général et de la persistance dans les systèmes sociaux en particulier. Les modèles de réseau et d'hypergraphe que nous développons contribuent à l'étude des systèmes complexes au-delà de la portée de cette dissertation. Deuxièmement, nous libérons l'accès aux données d'interaction à la recherche sur les structures relationnelles et les dynamiques des groupes dans les systèmes sociaux. En déduisant les relations et les groupes à partir de ces données, nous fournissons un nouvel ensemble d'outils qui permet d'étudier les systèmes sociaux sous un nouveau jour et avec une résolution temporelle inégalée.