

Einleitung und Überblick

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Visualisierung sozialer Strukturen. Dabei geht es darum, wie es graphische Darstellungen erlauben, Einsichten in komplexe Netzwerke von Beziehungen zu gewinnen.

Dazu untersuchen wir drei Fragen: (1) Wie und mit welchen Informationen Netze geordnet werden können, so daß aus ihren Darstellungen wesentliche Eigenschaften des Graphen abgelesen werden können. (2) Welche strukturellen Eigenschaften der Graphen und ihrer Einheiten in diese Abbildungen visuell integriert werden können, damit Besonderheiten der Strukturen klar und einfach identifiziert werden können, und wie man (3) zusätzliche externe Informationen auf die Darstellungen abbilden kann, so daß ihre Lagerung in der Struktur und lokale Konzentrationen von Merkmalen sichtbar werden.

Bei allen drei Problemen werden numerische Informationen in graphische Markierungen übersetzt: Beim Ordnen der Relationen werden Anordnungen der Einheiten eines Graphen gesucht, die es erlauben, die verbindenden Relationen zwischen den Punkten in bestimmter Weise optimal einzuzichnen. Lösungen dieses Einbettungsproblems bestimmen hierzu die Lage der Elemente des Graphen. Zur Übertragung von Grapheneigenschaften in die entstehenden Anordnungen können die Größen, Formen oder Farben von Symbolen verwendet werden. Bei der Exploration externer Merkmale und ihrer Zusammenhänge mit der Lagerung in der Struktur werden die Knoten und/oder Kanten des Graphen vornehmlich farblich markiert. Dies erlaubt, die Verteilungen externer Merkmale näher zu inspizieren.

Wie man mit graphischen Mitteln Einsichten in komplexe Zusammenhänge gewinnen kann, ist daher die Frage, die zuerst untersucht werden muß. Diese Arbeit versucht dazu, die in einer weit verstreuten Literatur vorhandenen Kenntnisse, wie man Informationen graphisch übersetzen kann, zusammenzutragen und zu systematisieren. Die bei der Untersuchung umfangreicher Graphen entwickelten Verfahren und Darstellungsformen werden auf dieser Grundlage anschließend schrittweise eingeführt. Dies erlaubt, Prinzipien und Elemente der Netzwerkvisualisierung zu identifizieren, den Kern und die Grundlagen einer visuellen Methodologie zu bestimmen, mit der mehrdimensionale Darstellungen von Netzwerken erzeugt und exploriert werden können.

Was gezeigt werden soll Besonderheiten von Graphen und die von ihnen repräsentierten Verflechtungen hat man in der Graphentheorie und bei der Untersuchung sozialer Netzwerke vornehmlich mit numerischen Verfahren identifiziert. Wie einzelne Akteure in ein sie umgebendes Netz eingebunden sind und wie sich ihre Stellung im System gegenüber anderen Akteuren auszeichnet, kann man beschreiben indem man die Anzahl der *direkten Beziehungen* einzelner Akteure betrachtet. Dehnt man die Betrachtung auf die über Dritte bestehenden *indirekten Beziehungen* aus, dann lassen sich in Netzwerken *zentrale* von eher *peripheren* Akteuren unterscheiden. Zentrale Akteure können alle anderen Akteure eines Netzes auf sehr kurzen Wegen erreichen.

Netze können aus *unverbundenen Teilsystemen* bestehen oder aber an bestimmten Stellen nur schwach verbunden sein. In diesem Fall zerfällt ein System in unverbundene *Komponenten*. *Lokale Verdichtungen* in Netzen entstehen dort, wo mehrere Akteure wechselseitig untereinander verbunden

sind. Diese kann man mit Kriterien unterschiedlicher Stärke als (Cliques, Clubs, Clans, k-cores, k-plexes oder lambda sets) identifizieren.

Eine dritte Perspektive bei der Analyse von Netzwerken versucht, Klassen von Akteuren zu identifizieren, die in gleichartiger Weise mit bestimmten Dritten verbunden sind. Dies erlaubt es ein Netzwerk als eine Menge von *Positionen* zu beschreiben, deren Akteure ähnliche Beziehungen aufweisen.

Schließlich bestimmt man in Netzwerken *Rollen* dadurch, daß Akteure dann als gleichartig angesehen werden, wenn sie Beziehungen zu (unterschiedlichen) Personen haben, die in einem Netz ähnliche Stellungen einnehmen. Rollen beschreiben damit Akteure, die in ähnlicher Weise Beziehungen zu (nicht notwendigerweise identischen) Dritten unterhalten.

Ordnen In dieser Arbeit geht es um die Analyse sozialer Strukturen. Wie Verflechtungen zwischen Einheiten systematisch mit automatischen Verfahren graphisch dargestellt werden können, ist die zentrale Frage. Graphen beschreiben Zusammenhänge zwischen Einheiten eines Systems. Der Versuch, diese Zusammenhänge zu ordnen und überschaubar zu machen, wird schnell so komplex, daß systematische automatische Verfahren erforderlich sind. Wie man Algorithmen konstruieren kann, die möglichst viele der Eigenschaften des zugrundeliegenden Graphen bei der Darstellung berücksichtigen, ist das erste Problem. Das zweite Problem besteht darin, die Informationen zu bestimmen, die Algorithmen dazu benutzen müssen.

Die mit verschiedenen Ordnungsverfahren erstellten Anordnungen bestimmen die Positionen der Einheiten in einer Weise, daß vernetzte Einheiten benachbart und nicht oder nur indirekt verbundene Einheiten entfernt zueinander positioniert werden. "Die entscheidende Aufgabe bei der Visualisierung eines Graphen, ... ist .. der Abgleich der räumlichen Anordnung innerhalb des Diagramms mit den strukturellen Eigenschaften des Graphen. Dieser Schritt wird auch das Layout der Visualisierung genannt. Dabei sind so komplexe Abhängigkeiten zu berücksichtigen, daß aussagekräftige, auf objektiven Kriterien beruhende Visualisierungen durch eine algorithmische Behandlung des Layoutproblems erst möglich werden." (Brandes 1999, p.III).

Die Nützlichkeit der Layouts hängt demnach davon ab, ob die bei der Analyse von Graphen identifizierbaren Eigenschaften, die Zentralität der Knoten und zusammenhängende Teilgruppen, identifiziert werden können, und ob diese Anordnungen auch geeignet sind, besondere strukturelle Lagerungen, wie die der Positionen und Rollen, zu unterscheiden.

Der methodologische Fokus dieser Arbeit ist das einzelne Bild, das einen möglichst umfassenden Einblick in Vorgänge gibt (vgl. a. Bertin 1983). Unter dieser Perspektive gewinnt die effektive Verwendung der graphischen Elemente eine besondere Bedeutung und erzwingt Optimierungen, wenn man Darstellungskonflikte nicht in Sequenzen mehrerer Bilder oder höherdimensionale Darstellungen auflösen will. Bereits bei drei-dimensionalen Darstellungen ist ein Wechsel von Perspektiven unverzichtbar, da bestimmte Blickwinkel zu Verdeckungen und Überlagerungen führen, so daß in der Regel auf interaktive Benutzerschnittstellen nicht verzichtet werden kann.

Markieren Welche zusätzlichen Informationen in die so entstehenden Darstellungen integriert werden können und in welcher Weise Eigenschaften von Graphen und ihrer Elemente visuell ko-

diert werden müssen, wie man Größen, Formen und Farben verwenden kann, um die Besonderheiten der Strukturen klar hervortreten zu lassen, ist eine weitere Frage. Diese Markierungen übertragen dabei bestimmte, bewußt ausgewählte Eigenschaften der Knoten, ihrer lokalen Umgebungen oder bestimmter Teilstrukturen in die Anordnungen und dienen damit der Hervorhebung besonderer Aspekte der Graphen.

Markiert man in Abbildungen geordneter Netze strukturelle Eigenschaften der Elemente mit Größen, dann hat dies für die Lesbarkeit der Abbildungen oft bereits erstaunliche Folgen: es entstehen Abbildungen der Verflechtungen die auch für Dritte einfach lesbar sind. Wie man Eigenschaften der Graphen in die Darstellungen integrieren kann und welche Markierung hierzu geeignet sind, untersuchen wir an thematisch sehr unterschiedlichen Problemen. Diese unterscheiden sich auch hinsichtlich des Informationsreichtums mit denen die Beziehungen und Attribute beschrieben sind. Die Anwendungen umfassen Problemstellungen binärer, symmetrischer Graphen bis hin zu bewerteten, gerichteten Netzen für die zusätzlich kontinuierliche Knoten und Kantenattribute zur Verfügung stehen.

Explorieren Ein dritter Schritt erlaubt es schließlich, zusätzliche Informationen, externe Attribute der Knoten oder Kanten eines Netzes, in Bezug auf die Lagerung in der Struktur eines Netzes zu untersuchen. Dabei werden die Knoten oder Kantensymbole entsprechend der für sie vorliegenden Informationen unter Verwendung geeigneter Farbschemata markiert. Merkmalskonzentrationen in bestimmten Bereichen der Netzwerke treten dadurch als besondere Gebiete in Erscheinung und verweisen auf Zusammenhänge der externen Information und der Lagerung der Einheiten in der Struktur.

In Kombination führt die Übertragung struktureller Eigenschaften und externer Attribute in die Lösungsanordnungen geordneter Netze oft zu intuitiv lesbaren, multidimensionalen Informationslandschaften, in denen selbst lokale Besonderheiten schnell erkannt werden können.

Datenvisualisierung Die Übersetzung von Daten in graphische Darstellungen wird heute allgemein als Problem der Informationsvisualisierung verstanden. Eine solche abstrakte Sicht versucht dabei, die generellen Probleme der Abbildung von Daten und Datenstrukturen in graphische Anordnungen zu systematisieren, zu verstehen, wie visuelle Merkmale (die Lage von Markierungen, Längen, Formen, Farben, Richtungen und Muster) verwendet werden können, um die mit numerischen Daten beschriebenen Informationen zu kommunizieren. Dies erlaubt, vergleichsweise einfache Schaubilder der mathematischen Statistik, z.B. Balken und Streudiagramme, die nur sehr sparsamen Gebrauch von der Vielfalt graphischer Markierungsmöglichkeiten machen¹, und sehr viel komplexere Darstellungsformen unter einer vereinheitlichenden Perspektive zu betrachten.

Unter dieser generellen Perspektive stehen damit auch metrische Repräsentationen von Netzwerken in Konkurrenz zu schematisierenden Anordnungen und Darstellungskonventionen, wenn diesen ähnliche Informationen entnommen werden können oder aber spezifische Aspekte von Netzwerken

¹Diese verwenden vornehmlich die Lage von Punkten und die Längen von Linien als bedeutungstragende graphische Markierungen und damit visuelle Elemente, die seit langem vergleichsweise gut verstanden sind.

einfacher dargestellt werden. Hinsichtlich der Platzierung der Einheiten eines Graphen sind euklidische Räume nur eine von mehreren Möglichkeiten, Anordnungen von Elementen zu erzeugen. Dort wo es darum geht, Mengen und Teilmengen in Systemen zu untersuchen und zu gruppieren, kann es bereits ausreichen, Topologien zu verwenden, in denen Ähnlichkeiten der Elemente anhand ihrer Nachbarschaften abgelesen werden können.

Im Prozeß der Datenvisualisierung lassen sich zumindest zwei Arbeitsschritte unterscheiden: die Aufbereitung von Rohdaten zu Datenstrukturen, und die Abbildung dieser Datenstrukturen auf visuelle Merkmale.² Die hierbei entstehenden Abbildungen werden dann als aussagekräftig angesehen, wenn in der visuellen Struktur alle Information der zugrundeliegenden Datenstrukturen repräsentiert sind und genau diese. Darstellungen werden dann als effektiver bezeichnet, wenn sie schneller zu interpretieren sind, eine größere Anzahl von Unterscheidungen ermöglichen, und bei ihrer Interpretation weniger Fehler auftreten, als dies bei alternativen Darstellungen der Fall ist³.

Methodologie Die abstrakte Sichtweise verdeutlicht auch, daß die Visualisierung von Daten keine zur üblichen Statistik alternative Technologie ist, sondern als deren Erweiterung aufgefaßt werden kann: die Dateninformationen bzw. die Resultate der statistischen Bearbeitung dieser Informationen werden einer zusätzlichen Abbildung in das Medium der visuellen Merkmale unterzogen. Dieses besitzt eine höhere Bandbreite und ermöglicht es, mehrere Informationen gleichzeitig zu kommunizieren.

Unter einer methodologischen Perspektive bleibt anzumerken, daß das zur Herstellung effizienter Visualisierungen benötigte Wissen sich nicht aus der Binnenperspektive der Statistik bestimmen läßt. Ob eine Abbildung die Kommunikation der durch die Daten beschriebenen Sachverhalte erleichtert, resultiert aus den Eigenschaften der dabei verwendeten visuellen Merkmale, ihrer Auflösungskraft, und der bei einer solchen Abbildung angewendeten Transformationsregeln. Effiziente Transformationen beruhen auf Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung. Sie erfordern detaillierte Kenntnisse welche Informationen und Ordnungen der Mensch visuellen Mustern entnehmen kann und unter welchen Bedingungen.

Kennt man die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Variation graphischer Markierungen und der Stärke der mit ihrer Variation beim Menschen einhergehenden Empfindungen, dann lassen sich die Dateninformationen so in visuelle Variablen übersetzen, daß in der Wahrnehmung korrespondierende Empfindungsunterschiede entstehen. Werden dagegen Dateninformationen zwar eindeutig aber ohne Berücksichtigung dieser Funktionen auf graphische Markierungen abgebil-

²“The reference model of information visualization developed in this chapter approximates the basic steps for visualizing information: The first step is to translate Raw Data to a Data Table, which can then be mapped fairly direct to a Visual Structure. View Transformation are used to increase the amount of information that can be visualized.” ...

“In visualization Data Tables are mapped to Visual Structures, which augment a spatial substrate with marks and graphical properties to encode information. To be a good Visual Structure, it is important that this mapping preserve the data (Mackinlay 1986). Data Tables can be often be mapped into visual representations in different ways. “Mackinlay (1999, p.33)

³A mapping is said to be expressive if all and only the data in the Data Table are also represented in the Visual Structure. ... A mapping is said to be more effective if it is faster to interpret, can convey more distinctions, or leads to fewer errors than some other mapping. Mackinlay (1999), p 23

det, so können die in den numerischen Daten enthaltenen Ordnungen verloren gehen bzw. müssen von einem Betrachter sequentiell durch die Zuordnung der Bedeutungen zu den Markierungen entschlüsselt werden.

Wie Längen von Linien, die Flächen von Kreisen und Quadraten, aber auch Farben in der menschlichen Wahrnehmung unterschieden werden, ist heute bekannt und kann, wie wir in Kapitel 2 darstellen, mit *psychometrischen Funktionen* beschrieben werden. Übersetzt man numerische Informationen unter der Verwendung psychometrischer Funktionen, dann resultieren aus der Abbildung menschliche Empfindungsmuster die denen der numerischen Messungen entsprechen. Da hierbei auch die Ordnungsrelationen zwischen den Dateninformationen erhalten bleiben, entstehen in der menschlichen Wahrnehmung *homomorphe* Abbildungen⁴ Wenn die natürlichen Ordnungen der menschlichen Wahrnehmung benutzt werden, können an den visuellen Mustern die gleichen Beziehungen und Zusammenhänge entdeckt werden wie an den numerischen Messungen.

Während man also bei der sozialwissenschaftlichen Messung⁵ versucht, Beobachtungen bzw. Merkmale von Akteuren und Objekten so in Zahlen abzubilden, daß deren Eigenschaften und Zusammenhänge ausschließlich durch Operationen an den numerischen Messungen untersucht werden können, unterzieht die Informationsvisualisierung diese numerischen Messungen einer zweiten Transformation in den Bereich visueller Merkmale. Numerische Informationen die ihrerseits bereits Abbildungen von Beobachtungen sind, werden somit unmittelbar in korrespondierende menschliche Empfindungen abgebildet. Graphischen Markierungen können diese Informationen nicht nur besonders schnell entnommen werden, sie erlauben es auch, mehrere Informationen simultan zu kommunizieren.

Unter der Perspektive der Informationsvisualisierung ist man demnach daran interessiert, das Universum visueller Elemente zu identifizieren, mit denen Informationen einfach zu kodieren sind. Hierbei sucht man solche visuellen Elemente, die möglichst unabhängig voneinander zur Kommunikation von Informationen benutzt werden können. Dies ermöglicht die Darstellung multidimensionaler Verteilungen.

Für die visuellen Dimensionen kann man in einem weiteren Schritt versuchen, die Funktionen zu identifizieren, die beschreiben, wie diese Merkmale in der Wahrnehmung unterschieden werden. Unter ihrer Kenntnis lassen sich numerische Daten so in visuelle Merkmale übersetzen, daß die Dateninformationen und die zwischen diesen bestehenden Ordnungen erhalten bleiben. Graphische Markierungen können damit so gestaltet werden, daß die in den Daten enthaltenen Informationen

⁴“Mit \gg homomorpher Abbildung \ll wird im Gegensatz zur \gg Abbildung \ll ausgesagt, daß empirische Objekte nicht nur einfach auf Zahlen abgebildet werden, sondern dies so geschieht, daß die empirischen Relationen gleichzeitig in den numerischen Relationen erhalten bleiben... Eine eineindeutige homomorphe Abbildung heißt auch Isomorphismus oder Strukturgleichheit. Isomorphe Abbildungen können aus homomorphen Abbildungen jederzeit durch geeignete Zusammenfassung von empirischen Objekten zu Äquivalenzklassen hergestellt werden (f ist dann keine Punktfunktion mehr, sondern eine Mengenfunktion.)“ Gigerenzer (1981), p.45f

⁵“Definition: Eine homomorphe Abbildung (Repräsentation) eines empirischen Systems in (durch) ein numerisches System heißt Messung

Aus dieser Definition ergibt sich unmittelbar ein wesentlicher Nutzen der Messung. Dieser besteht darin, daß die Relationen zwischen Zahlen stellvertretend für die Relationen zwischen empirischen Objekten gehandhabt und so empirische Aussagen(wie z.B. über die Stärke von Zusammenhängen zwischen psychologischen Merkmalen) abgeleitet werden können....“ Gigerenzer (1981), p.46

präzise, leicht und schnell kommuniziert werden.

Kapitel 1 Der Startpunkt dieser Arbeit ist ein Kapitel, das versucht die Rolle graphischer Verfahren bei der Verarbeitung großer Informationsmengen nachzuzeichnen. Angesichts der langen Tradition, Informationen visuell zu kodieren, sind die Erfahrungen und Konventionen der Kartographie ein wichtiger Ausgangspunkt. In der Kartographie sind bereits seit langem Darstellungs-konventionen entwickelt worden, die auf langjährigen Erfahrungen mit der Verwendung graphischer Zeichen und Markierungen zur Kommunikation von Informationen beruhen.

Warum visuelle Darstellungen im menschlichen Denken und Problemlösen zum Entdecken, Orientieren und Erkennen von Zusammenhängen führen, ist jedoch die zugrundeliegende Frage. So hat z.B. das theoretische Verständnis der Frage, weshalb gerade die mit der technischen Entwicklung digitaler Medien entstandenen vielfältigen neuen Formen graphischer Kommunikation so erfolgreich zur Vermittlung komplexer Zusammenhänge eingesetzt werden können, nicht Schritt halten können.

Auch wenn der Versuch, dieser Frage nachzugehen, angesichts der Komplexität der menschlichen Wahrnehmung und der Vielfalt der kognitiven Prozesse nahezu aussichtslos erscheint, ergeben sich bereits bei einer knappen Zusammenstellung von Befunden verschiedene Hinweise darauf, daß die menschliche Wahrnehmung und das menschliche Denken die durch die Abbildung numerischer Informationen entstehenden Muster sehr flexibel verarbeiten kann und selbst ihren Vereinfachungen noch vielfältige Informationen entnehmen kann.

Offensichtlich kann die menschliche Wahrnehmung nicht nur euklidischen Darstellungen quantitative Informationen entnehmen. Bereits aus Topologien können quantitative Informationen abgelesen werden, und Orientierungsleistungen in komplexen Informationsmengen können mit nur wenigen Bezugspunkten erbracht werden. Dies bedeutet auch, daß bei der Transformation von numerischen Ergebnissen schematische Vereinfachungen möglich sind, ohne daß der wesentliche Informationsgehalt einer Darstellung verloren gehen muß. Damit tritt auch der Nutzen von Prozeduren in Sichtweite, die es gestatten, Vereinfachungen von Anordnungsmustern flexibel zu erzeugen, metrische Einbettungen in Topologien zu verwandeln oder topologische Anordnungen zu verformen.

Kapitel 2 Im zweiten Kapitel versuchen wir effiziente Transformationsregeln für den Gebrauch elementarer visueller Merkmale zu identifizieren. Dazu stellen wir Erkenntnisse der statistischen Graphik, der Untersuchung von Orientierungs- und Suchprozessen, der Wahrnehmungspsychologie und der Colormetrie zusammen.

Auch in der statistischen Graphik hat man sich mit der Frage auseinandergesetzt, welche Markierungen zur Kommunikation qualitativer und quantitativer Merkmale besonders gut geeignet sind. Im Wesentlichen wird dabei auf die bei Bertin beschriebenen visuellen Variablen Bezug genommen, die hinsichtlich ihrer Eignung, nominale, ordinale und metrische Informationen zu kommunizieren, geordnet werden.

Bertins Merkmale haben sich auch bei der Untersuchung von Such- und Orientierungsprozessen als besonders effektiv erwiesen. Sie werden durch den Menschen in sehr kurzer Zeit entschlüsselt und erlauben es, in einfachen Vorlagen ohne willentliche Aufmerksamkeitssteuerung Suchaufgaben in sehr kurzer Zeit quasi automatisch zu bewältigen.

Für die Netzwerkvisualisierung sind neben der Lage von Markierungen insbesondere die Eigenschaften der Größenmarkierungen und der Farben interessant, wenn zusätzliche Informationen über Netze kommuniziert werden sollen. Wie die Größe physikalischer Reize, wie die Länge von Linien in der Wahrnehmung unterschieden werden, ist gut untersucht und funktional beschrieben. Dies gilt auch für die Flächen einfacher geometrischer Markierungen wie Kreise und Quadrate.

Wenngleich die Eigenschaften von Farben ungleich komplexer sind, so sind heute auch die der Wahrnehmung von Farben zugrundeliegenden Metriken bekannt. Psychometrische Farbmodelle beschreiben gleichabständige Stufen von Empfindungen, die vom Menschen bei Farbtönen, Helligkeiten und der Farbsättigung unterschieden werden können. Sie erlauben es, Farben zur Kommunikation von Daten einzusetzen, so daß Daten isomorph in menschliche Sinneseindrücke abgebildet werden.

Das Ziel, die Effizienz der Darstellungen durch den Einsatz effektiver Transformationsregeln zu verbessern, kann man aus der Perspektive einer Informationsökonomie betrachten: Graphische Darstellungen sind umso leistungsfähiger, wenn sie es in gleichen Zeitintervallen erlauben, größere Informationsmengen zu bearbeiten. Damit ist gleichzeitig ein einfaches Kriterium zur Evaluation von Visualisierungen definiert.

Kapitel 3 Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit sozialen Netzwerken, ihren Eigenschaften, ihrer graphischen Darstellung und einfachen Erklärungsversuchen der Struktur sozialer Netzwerke.

Wir beginnen mit einer kurzen Zusammenstellung von Netzwerkeigenschaften wie sie heute typischerweise mit Verfahren der Netzwerkanalyse identifiziert werden. Dabei werden strukturelle Eigenschaften der Elemente identifiziert, zusammenhängende Teilstrukturen, die bestimmte Eigenschaften haben, und auch besondere Lagerungen von Akteuren die in ähnlicher Weise in die sie umgebende Struktur eingebunden sind.

Zur Erklärung der Struktur sozialer Systeme werden oft Typologien von Akteuren verwendet. Formal resultieren aus solchen einfachen Erklärungen nichtüberlappende Teilmengen der Elemente eines Systems. Je nach dem Ausmaß, in dem diese Teilmengen besondere Lagerungen identifizieren, können sie als Erklärungen von Strukturen gelten.

Graphische Bildsprachen, mit denen Beziehungen zwischen Teilmengen untersucht werden können, sind sehr alt. Mengendiagramme, die heute als Venn-Diagramme bekannt sind, erlauben es Beziehungen zwischen Teilmengen und logische Implikationen von Aussagen darzustellen. Sie verwenden einfache geometrische Figuren wie Kreise und stellen deren Zusammenhänge mit überlappenden Flächen dar. Dies erlaubt es auch, Nachbarschaften sowie Ordnungen und Reihungen von Teilmengen zu identifizieren, wenn bestimmte Mengen andere Mengen umschließen. Wenn sich Systeme mehrerer Teilmengen mit konzentrischen Kreisen darstellen lassen, dann können bereits aus diesen Darstellungen Entfernungen zwischen Nachbarschaften als Distanzen abgelesen werden. Derartige Anordnungen werden bereits seit langem bei der graphischen Darstellung von Netzwerken verwendet. Sie eignen sich als Bezugssystem für die Lagerung der Elemente und gestatten es z.B., deren Lage zum Schwerpunkt des Gesamtsystems zu verdeutlichen.

Kapitel 4 Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit Verfahren, mit denen Netzwerke geordnet werden können. Die mit Netzwerken beschriebenen Verflechtungen zwischen den Einheiten eines Graphen

stellen ein sehr komplexes Problem dar. Bei der Visualisierung sind dabei graphische Formen zu finden, die wesentliche Eigenschaften der zugrundeliegenden Graphen erhalten.

In einem ersten Abschnitt diskutieren wir, wie einfache Abbildungen in der Tradition der Kreisdiagramme behandelt werden können, so daß mit automatischen Verfahren Darstellungen erzeugt werden, die Auskunft über die Struktur eines Graphen geben. Dazu verwenden wir einen Algorithmus der die Zuordnung der Knoten zu fixen Positionen so optimiert, daß die Gesamtlänge aller Kanten minimal wird. Wir zeigen wie ein solcher Algorithmus einfache Strukturen darstellen kann und daß mit diesem Verfahren Darstellungen erzeugt werden können, die Resultate bekannter und mit statistischen Verfahren gut untersuchter Datensätze reproduzieren. Schließlich demonstrieren wir, wie man das Verfahren einsetzen kann, um Netze von a priori klassifizierten Teilmengen näher zu untersuchen. Leitet man für die so unterschiedenen Teilmengen geometrische Beschränkungen des Lösungsraumes ab, indem man wie bei Venn Diagrammen z.B. einzelne Mengen verschiedenen Kreisen zuordnet, dann sortiert der Algorithmus das Gesamtsystem in einer Weise, daß zentrale Einheiten Plätze in Richtung auf das Zentrum des Gesamtsystems oder aber in Richtung auf Hauptinteraktionspartner einnehmen. Periphere oder aber nur innerhalb der gleichen Menge verbundene Akteure nehmen stattdessen Orte in der Peripherie des Systems ein.

Eine zweite Gruppe sehr flexibler Verfahren, die sich bei der Ordnung von Graphen bewährt haben, sind die sogenannten Spring Embedder. Diese Verfahren ordnen Graphen, indem sie zwischen direkt verbundenen Einheiten anziehende Kräfte verwenden und gleichzeitig zwischen allen Einheiten abstoßende Kraftfelder einführen. Die hierbei entstehenden Gleichgewichte führen oft zu einfach lesbaren Layouts, die unter Berücksichtigung weiterer Gesichtspunkte optimiert werden können. Wir stellen dar, wie man diese Verfahren für zwei spezielle Klassen von Graphen (bipartite und bewertete Graphen) modifizieren kann, so daß auch diese Problemklassen flexibel geordnet werden können.

Die besonderen Vorzüge dieser Verfahren bestehen darin, daß man mit ihnen Einbettungen der Graphen innerhalb gewisser Grenzen flexibel transformieren kann, wobei die Nachbarschaften der Anordnungen erhalten bleiben. Die Verformungen der Lösungstopologien sind besonders dort nützlich, wo zusätzliche Informationen über die Netzwerke mit Größenmarkierungen kommuniziert werden sollen.

Kapitel 5 Das fünfte Kapitel untersucht wie die Layouts mit zusätzlichen Informationen angereichert werden können, die eine schnellere Orientierung in den Darstellungen komplexer Netzwerke ermöglichen. Hierbei werden Eigenschaften der Graphen mit Markierungen in die Layouts integriert, die es erlauben, besondere Lagerungen der Elemente des Systems zu identifizieren.

Wir verwenden *Zonensymbole*, mit denen die Einbettung der Elemente des Graphen in die sie umgebende Struktur beschrieben werden kann, benutzen *konvexe Hüllen* um die Lagerung von Teilsystemen in der Struktur zu identifizieren, und demonstrieren, wie die Zentralität besonderer Positionen eines Netzes mit den kürzesten Pfaden zu allen erreichbaren Knoten illustriert werden kann.

In einem Exkurs untersuchen wir, ob die mit Spring Embeddern erzeugten Anordnungen auch geeignet sind, komplexere Befunde der Netzwerkanalyse darzustellen. Hier geht es darum, Darstellungsformen und Markierungen zu entwickeln, mit denen analytisch durch Verfahren der Netzwerkanalyse bestimmte Positionen (Mengen äquivalenter Akteure die gleichartig in die umgebende

Struktur eingebunden sind) dargestellt werden können. Dabei verwenden wir Hüllen und Aggregationen, um die Ergebnisse von Blockmodellanalysen graphisch zu kommunizieren.

Kapitel 6 Ein weiterer Exkurs im sechsten Kapitel demonstriert, wie bereits die Transformation verschiedener Layouts des gleichen Datensatzes zusätzliche Einsichten in das zugrundeliegende Netzwerk ermöglicht. Dabei wird ein unter geographischen Einschränkungen geordnetes System von Tauschbeziehungen in ein soziales System transformiert, das Auskunft über den Kern des zugrundeliegenden Tauschsystems gibt. Dies erlaubt es, den sozialen Kern der überregionalen Austauschstruktur zu identifizieren. Um zu beantworten, inwiefern das System eher auf rituellen Austauschbeziehungen, Verwandtschaftsbeziehungen oder reinen Tauschbeziehungen beruht, werden die Beziehungen dieses Kerns mit zusätzlichen Informationen inspiziert.

Kapitel 7 Im siebten Kapitel wenden wir uns der Frage zu, wie man zusätzliche externe Informationen in die Layouts übertragen kann. Hierbei verwendet man vornehmlich Farbschemata. Sie erlauben es, selbst sehr komplexe Zusammenhänge visuell zu explorieren, die in numerischer Form kaum mit ähnlicher Flexibilität und nur mit erheblich größerem Aufwand hinsichtlich verschiedener Beurteilungsaspekte inspiziert werden können. Je nach Informationsgehalt zusätzlicher Attribute werden ihre Verteilungen in den lokalen Umgebungen der Knoten mit nominalen oder sequentiellen Farbschemata unter Verwendung von Kreisdiagrammen dargestellt. Durch die Übertragung der durch die Attribute unterschiedenen Merkmalsklassen mit Farben entstehen Muster, aus denen die relativen Anteile bestimmter Merkmale abgelesen werden können. Bei ordinalen oder metrischen Attributen lassen sich die sequentiellen Farbanordnungen auch als kumulierte Verteilungen vergleichen.

Hier verwenden wir Welthandelsdaten, die wir als bewerteten Graphen auffassen. Wir ordnen diese Daten mit einem metrischen Spring Embedder. Dabei untersuchen wir, wie nominale und quantitative Knotenattribute (die regionale Zugehörigkeit der Länder und deren Bruttosozialprodukt) mit Farbschemata in die Layouts übertragen werden können, und zeigen darüberhinaus, wie man aus diesen Knotenattributen bedeutungstragende Markierungen der Kanten ableiten kann. Werden diese abgeleiteten Kantenattribute zusätzlich mit Farbmarkierungen in die Layouts übertragen, dann treten zusammenhängende Teilsysteme von Akteuren mit gleichartigen Attributen als lokale Besonderheiten visuell in Erscheinung. Gleichartige farblich markierte Bereiche in den so markierten Netzen verweisen auf lokale Konzentrationen der externen Merkmale in der Struktur bzw. auf Korrelationen mit der Lagerung in der Struktur.

In einem dritten Fall liegen zusätzliche externe Merkmale als Kantenattribute vor. Diese können mit Farbmarkierungen der Kanten des Graphen übertragen werden. Hierbei handelt es sich um besonders komplexe Informationen (Wachstumsraten von Flüssen über Zeit, Konzentrationen von Handelsgütern, Schätzfehler statistischer Modelle), die auf spezielle Muster untersucht werden können. Mit Zonensymbolen kann die Verteilung der Kantenattribute in den primären Umgebungen der Knoten beschrieben werden. Die Darstellungen solcher Verteilungen geben einerseits Auskunft über die Konzentration bestimmter Merkmale in der lokalen Umwelt eines Knotens, andererseits können die Verteilungen visuell vergleichsweise einfach mit denen anderer Knoten verglichen werden:

Ähnlichkeiten der lokalen Verteilungen mehrerer Knoten weisen farblich gleichartige Muster auf. In dem Ausmaß in dem in geordneten Netzen benachbarte Positionen oder Teilsysteme ähnliche lokale Verteilungen aufweisen, ist die Lage in der Struktur zusätzlich zur Verbundenheit durch lokal gleichartige Merkmalskonzentrationen gekennzeichnet. Benachbarte Lagen oder Verdichtungen in den Anordnungen der Graphen sind dann auch hinsichtlich externer Merkmale multidimensional ähnlich gelagert. Lassen sich mehrere solcher multidimensional homogener Teilsysteme identifizieren, dann eröffnet dies neue theoretische Perspektiven, Ordnungen und Vorgänge in den Strukturen besser zu verstehen.

Schließlich demonstrieren wir, wie die so angereicherten Darstellungen mit Selektionen und Aggregationen näher exploriert werden können. Selektionen von Handelsflüssen, die bestimmte Volumina überschreiten, erlauben es, nicht nur die Komplexität der Darstellungen zu reduzieren, sondern auch die Lagerung der Elemente näher zu explorieren. Aggregationen von Einheiten und ihren Attributen sind ein zweites Werkzeug mit denen Darstellungen gezielt untersucht werden können ohne daß die Netze neu geordnet werden müssen.

Kapitel 8 Das Schlußkapitel versucht, die in dieser Arbeit beschriebenen Erfahrungen zum Ordnen von Graphen, zur graphischen Markierung struktureller Eigenschaften, zur Darstellung externer quantitativer Informationen in Strukturen und zur Exploration der so entstehenden Muster zusammenzufassen und auszuwerten. Schließlich werden Entwicklungsperspektiven und offene Fragen der Visualisierung von Strukturen identifiziert.