

Artikel aus:
Zeitschrift für digitale Geisteswissenschaften

Titel:
Wissensgraphen: Interdisziplinäre Perspektiven für Linked Data in den Geistes- und Sozialwissenschaften

Autor/in:
Jens Dörpinghaus

Kontakt:
jens.doerpinghaus@bibb.de

Institution:
Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) | Universität Koblenz-Landau


GND:
1159997500

ORCID:
0000-0003-0245-7752

DOI des Artikels:
[10.17175/2022_011](https://doi.org/10.17175/2022_011)

Nachweis im OPAC der Herzog August Bibliothek:
[1819368734](#)

Erstveröffentlichung:
08.12.2022

Lizenz:
Sofern nicht anders angegeben 

Medienlizenzen:
Medienrechte liegen bei den Autor*innen

Letzte Überprüfung aller Verweise:
25.11.2022

Format:
PDF ohne Paginierung, Lesefassung

GND-Verschlagwortung:
[Wissensgraph](#) | [Linked Data](#) | [Interdisziplinarität](#) | [Graphentheorie](#) | [Geisteswissenschaften](#) |

Zitierweise:

Jens Dörpinghaus: Wissensgraphen: Interdisziplinäre Perspektiven für Linked Data in den Geistes- und Sozialwissenschaften. In: Zeitschrift für digitale Geisteswissenschaften 7 (2022). HTML / XML / PDF. Abrufbar unter DOI: [10.17175/2022_011](https://doi.org/10.17175/2022_011).

Jens Dörpinghaus

Wissensgraphen: Interdisziplinäre Perspektiven für Linked Data in den Geistes- und Sozialwissenschaften

Abstracts

Wissensgraphen und *Netzwerkansätze* sind in ganz verschiedenen Disziplinen ein immer lebhafteres Forschungsthema. Dieser Artikel würdigt ihre parallele Entwicklung in Anwendung und Mathematik und die verschiedenen gegenwärtigen Ansätze zwischen Informatik, Mathematik, Data Science und den Geistes- und Sozialwissenschaften. Daraus ergeben sich zentrale interdisziplinäre Perspektiven: Erstens müssen die Netzwerkansätze in den Geistes- und Sozialwissenschaften breiter gefasst werden, da sich durch die Verwendung von *Linked Data* bereits implizit Wissensnetzwerke ergeben. Zweitens ergeben sich durch die methodische Breite von Wissensgraphen, in der beispielsweise soziale Netzwerke als Wissensgraphen aufgefasst werden können, neue Werkzeuge und neue Analysemethoden. Insofern versteht sich dieser Beitrag als Plädoyer für den interdisziplinären Austausch und eine vertiefte Diskussion über Methoden, Algorithmen und Linked Data Ansätze.

Knowledge graphs and *network approaches* are an increasingly vibrant research topic in quite different disciplines. This article acknowledges their parallel development in applied and mathematical fields, and the various current approaches between computer science, mathematics, data science, and the humanities and social sciences. This gives rise to key interdisciplinary perspectives: first, network approaches in the humanities and social sciences need to be broader, as knowledge networks are already implicit in the use of *Linked Data*. Second, the methodological breadth of knowledge graphs, in which, for example, social networks can be conceived as knowledge graphs, results in new tools and new methods of analysis. In this respect, this paper is intended as a plea for interdisciplinary exchange and in-depth discussion of methods, algorithms, and Linked Data approaches.

1. Einleitung

Wissensgraphen spielen in der Informatik seit vielen Jahren eine immer größer werdende Rolle für die Speicherung und Analyse großer Datenmengen. Dabei werden sie aber auch in der interdisziplinären Forschung, z. B. in der Bio- und Medizininformatik, immer häufiger verwendet. Das Gebiet der Graphentheorie wiederum ist ein Teilgebiet der Mathematik. Und ebenso gibt es auch eine große methodische Überschneidung mit den Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften. In dieser Arbeit soll zunächst untersucht werden, inwiefern diese verschiedenen Perspektiven methodisch übereinstimmen. Für eine interdisziplinäre Perspektive auf Wissensgraphen sollen auch Synergien, sowie Vor- und Nachteile ihrer Verwendung für bestimmte Fragestellungen in den digitalen Geistes- und Sozialwissenschaften diskutiert werden.

Aufgrund der verschiedenen Anwendungsfälle gibt es vielfältige – aber äquivalente – Konzepte und damit auch Arten, Wissensgraphen zu verwenden: Im Bereich des Semantic Web spricht man von Wissensgraphen bzw. Knowledge Graphen, im Bereich der Datenverarbeitung und Datenbanken von Labeled Property Graphs und in der Graphentheorie schlicht von Graphen. Dieser Artikel möchte nun nicht nur die verschiedenen Begrifflichkeiten einführen und ihre Perspektiven und Schnittmengen diskutieren, sondern auch einen Überblick über die Entwicklung der Methoden in den Disziplinen der Graphentheorie (diskrete Mathematik), der Informatik (Algorithmik) und der Data Sciences (Graphdatenbanken und Semantic Web) geben. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Stärken und Schwächen von Wissensgraphen unter bestimmten Vorbedingungen darzustellen und zu würdigen. Es folgt deshalb in **Abschnitt 3** ein Blick ›zurück‹ in Form eines kurzen Forschungsüberblickes auf die Graphentheorie, der insbesondere die interdisziplinäre Verwendung von Netzwerkansätzen thematisiert.

In **Abschnitt 4** möchte der Artikel auf die Besonderheiten der Verwendung von Wissensgraphen in den Geistes- und Sozialwissenschaften eingehen: Die Stärke von Wissensgraphen liegt in der einfacheren und übersichtlicheren Speicherung (vormals) unstrukturierter Daten. Gerade durch diesen methodischen Schritt der Datenrepräsentation ergibt sich nicht nur wissenschaftstheoretisch der interdisziplinäre Schritt von der Hauptdisziplin (z. B. der Biologie oder Soziologie) in die Informatik und Mathematik, sondern auch ein formales Datenschema für verknüpfte Datensätze, also *Linked Data*. Dies ist besonders wichtig mit Blick auf die Interoperabilität von Daten und die Reproduzierbarkeit von wissenschaftlichen Ergebnissen. Hierbei ergibt sich auch ein Ausblick auf *FAIR Data*¹. Damit werden in **Abschnitt 4** die Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten zusammengefasst.

¹ Vgl. Wilkinson et al. 2016.

Abschließend soll – mit einem Blick ›nach vorne‹ – in Abschnitt 5 die größtenteils unabhängige Entwicklung von Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften anhand ausgewählter Beispiele wie der *sozialen Netzwerkanalyse* (SNA) oder der *Computational Social Sciences* dargestellt werden. Hierbei soll detailliert aufgeschlüsselt werden, welche Vorteile sich aus dem Konzept von Linked Data ergeben. Somit ist dieses Kapitel als praktische Reflexion des vorher diskutierten zu verstehen. Ein Fazit und Ausblick bildet den Abschluss dieses Textes.

2. Wissensgraphen aus verschiedenen Perspektiven

Interessanterweise werden für Wissensgraphen zwei philosophische Konzepte sprachlich aufgegriffen: Man spricht von *Entitäten* (englisch *Entities*) und verwendet ebenso – allerdings nicht durchgängig – den Begriff der *Ontologie* (englisch *Ontology*). Eine Entität ist ein konkretes, abgrenzbares, abstraktes Objekt aus der realen Welt, dessen Informationen gespeichert und verarbeitet werden können. Dies kann beispielsweise eine Person, ein Auto oder ein Produkt sein. Eine Entität wird aus Sicht der Informatik als Datenpunkt durch ihre Attribute und Eigenschaften definiert. In der Philosophie können – ohne im Detail darauf einzugehen – verschiedene Abstraktionen einer Entität untersucht werden². Dabei ist diese auch für andere Geisteswissenschaften elementar: So treten besondere Probleme auf, »wenn Forscher versuchen, große Datenmengen computergestützt zu analysieren und dann in ihren synchronen und diachronen Verhältnissen darzustellen, denn dies erfordert eine Abstraktion von den tatsächlichen Forschungsgegenständen.«³ Diese Problemstellung wird uns im interdisziplinären Gespräch begleiten.

Eine Ontologie umfasst nunmehr meist eine formal geordnete Darstellung und Definition von Eigenschaften und Beziehungen zwischen den einzelnen Entitäten. Daniel von Wachter fasst die philosophische Sicht so zusammen: »Ziel in der Ontologie ist es herauszufinden, was die grundlegenden Bestandteile der Welt oder eines Bereiches der Welt sind und in was für Zusammenhängen diese Bestandteile stehen. Ziel ist es, ontische Strukturen der Welt zu entdecken.«⁴ Interessanterweise kommen Ontologien vor allem in der Bioinformatik zum Einsatz⁵, ein Zusammenhang, der im nächsten Abschnitt näher untersucht werden soll. Grundsätzlich bleibt aber in jeder Geisteswissenschaft das Problem der Hermeneutik bzw. der hermeneutischen Reichweite auch für Daten bestehen. So definiert Wettlaufer für die Geschichtswissenschaft: »Was aber ist mit hermeneutischer Reichweite genau gemeint? Ich verstehe darunter die Möglichkeit, mit digitalen Methoden ein besseres Textverständnis zu erzielen, als dies ohne diese Methoden möglich wäre.«⁶ Aber auch hier spannt sich der Bogen zur Biologie: »Ebenso wie das Quellenproblem tritt das Interpretationsproblem in Biologie, Linguistik und Geschichte auf. Schon die Vorauswahl der Daten, die zur Analyse herangezogen werden, ist ein Interpretationsvorgang.«⁷ Insofern treten gerade in diesem interdisziplinären Arbeiten die im Bereich Data Science typischen Problemstellungen auf: Der sogenannte *Data Lifecycle* beinhaltet die vier Schritte:

1. Daten sammeln bzw. wiederverwenden
2. Daten speichern
3. Daten verarbeiten und
4. Daten analysieren

Ein Netzwerkansatz muss diese vollständig umfassen und in jedem Schritt können Verzerrungen entstehen.

Auf die konkreten Vorteile von Ontologien aus Sicht der Informatik soll in den nächsten Teilabschnitten eingegangen werden. Allerdings müssen nicht alle Wissensgraphen als Ontologie ausgeführt werden.

Für Anwendungen, die weniger komplexe Datenmodelle verarbeiten, werden teilweise simplere Schemata definiert, welche verschiedene Bezeichnungen tragen. Teilweise werden in der Fachliteratur nur Schlagworte verwendet, welche mehrere Modelle umfassen. Über die Definitionen unterschiedlicher Modelle zur Organisation von Wissen existieren mehrere Standards⁸. Ein häufig verwendeter Überbegriff ist *Controlled Vocabularies*. Diese umfassen Systeme mit allgemeinen Sammlungen von Bezeichnungen. Ihre Komplexität reicht von einfachen Wortlisten, Synonymlisten, Taxonomien bis hin zu komplexen Thesauri. Oft werden diese Konzepte synonym mit Terminologien verwendet, die nicht etwa für die ›Lehre von Fachbegriffen‹ stehen, sondern

² »Diese Abstraktion kann die singuläre bzw. sinnhafte Materie, d.h. diesen oder jenen Körper, betreffen: abstractio physica. Sie kann sich aber auch sowohl auf die singuläre wie allgemeine Materie beziehen, die wie erstere ebenfalls nur secundum rationem abstrahiert wird. Das ist die abstractio mathematica und die abstractio ontologica, das bedeutet: die in der Philosophie vom Seienden bzw. den Transzendenzien stattfindende Abstraktion. Schließlich gibt es eine Abstraktion von der Materie secundum rem und secundum rationem. Das ist die abstractio transnaturalis, die auf Gott und die Intelligenzen zutrifft.« Kremer / Wolf 2017.

³ Krischel et al. 2009, S. 589.

⁴ von Wachter 2000, S. 10.

⁵ Vgl. beispielsweise Dessimoz / Škunca (Hg.) 2017.

⁶ Wettlaufer 2016.

⁷ Krischel et al. 2009, S. 587.

⁸ Vgl. Zeng et al. 2007.

für ein Datenmodell. Dies beinhaltet eine konkrete Sammlung von Werten, d. h. Entitäten, die einem gemeinsamen Fach- oder Anwendungsgebiet angehören. Zusammen bilden sie das grundlegende Vokabular, mit welchem argumentiert wird. Eine digital verarbeitete Definition solchen Wissens ist hilfreich, trotzdem gibt es keinen technischen Standard für Terminologien.

Bevor wir uns mit den Grundlagen der weiteren formalen Definition von Netzwerken zuwenden, soll zunächst auf einen für die Geistes- und Sozialwissenschaften im Allgemeinen prägenden Aspekt eingegangen werden. Der Netzwerkgedanke ist hier hochgradig mit der Visualisierung verknüpft: »Häufig können über Visualisierungen Sachverhalte verdeutlicht werden, die sonst nur schwer sprachlich umschrieben werden können, und da Computer die idealen Werkzeuge sind, um große Datenmengen zu visualisieren, bietet sich eine Verknüpfung geradezu an.«⁹ In der Tat finden Netzwerkansätze nicht selten ein »natürliches Gegenüber« in verschiedenen Fragestellungen, etwa in der »biographischen Narrativbildung«, wobei es der »Theorie der digitalen Methodik [weit eher] entsprechen [würde], diese Form der biographischen Narrativbildung durch einen Netzwerkansatz zu ersetzen, d. h. Biographien von vornherein in ihrer gegenseitigen Verzahnung zu denken.«¹⁰ Allerdings hat die Anwendung von Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften auch eine gewisse Beliebigkeit. So fasst Gramsch für die historische Forschung zusammen: »Rezipiert wird von ihnen meist nur der Begriff, nicht aber das mathematisch-statistische Methodenrepertoire, das mit ihm in Verbindung steht. Dies ist soweit legitim, wie der Gebrauch einer Metapher unmittelbar Einsichten vermitteln kann.«¹¹ Auch dieser Aspekt soll im interdisziplinären Gespräch noch genauer analysiert werden.

Doch auch im Bereich der Informatik und Mathematik sind die Begriffsbilder nicht eindeutig: Im Semantic Web spricht man von Knowledge Graphen, im Bereich der Datenverarbeitung und Datenbanken von Labeled Property Graphs und in der Graphentheorie schlicht von Graphen.

Es fehlen allerdings eine globale wissenschaftstheoretische Verortung und eine interdisziplinäre Perspektive auf Netzwerke und Graphen: Zum einen ist die Wahrnehmung der Anwendungen aus den Geistes- und Sozialwissenschaften und ihrer theoretischen Anforderungen in den Naturwissenschaften bestenfalls eine Randerscheinung. Gleichzeitig werden die theoretischen Erkenntnisse, Ansätze und Methoden aus den Naturwissenschaften in den digitalen Geistes- und Sozialwissenschaften noch recht spärlich aufgenommen¹². Dies liegt sicherlich zum einen in der Datenmenge (*Big Data* findet sich bei oft händisch kuratiertem Wissen kaum), aber auch im Fehlen sprachlicher und methodischer Anknüpfungspunkte zwischen den Disziplinen begründet. Über diesen Graben der interdisziplinären Arbeit möchte der Artikel – wenn schon keine Brücke – dann doch zumindest ein weiteres Seil spannen und für eine enge Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen werben.

So soll nun zunächst das mathematische Konzept eines Netzwerks, das des Graphen, diskutiert werden.

2.1 Das mathematische Konzept eines Graphen

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der diskreten Mathematik. In der Physik, der Mathematik, der Biologie, den Biowissenschaften und anderen Bereichen wird das Konzept eines Graphen oft als Netzwerk bezeichnet. Im folgenden Abschnitt verwenden wir den Begriff des Graphen und schließen dabei Netzwerke mit ein.

Ein Graph $G = (V, E)$ ist definiert durch die Menge V der Knoten (englisch *vertices*) und die Menge der Kanten E . Zwei Knoten $u, v \in V$ sind benachbart oder Nachbarn, wenn eine Kante $\{u, v\} \in E$ zwischen beiden existiert. Ein Graph G wird gerichtet genannt, wenn die Kanten eine Richtung haben. In diesem Fall ist $(u, v) \neq (v, u)$. Ein Graph ist *ungerichtet*, wenn die Kanten keine Richtung haben. Dies bedeutet, dass in einem ungerichteten Graphen $(u, v) \in E \Leftrightarrow (v, u) \in E$.

Im Allgemeinen wird zwischen dem mathematischen Konzept eines Graphen und seiner Darstellung, d. h. der Visualisierung unterschieden. Ein Graph kann verschiedene Darstellungen haben, die für die visuelle Analyse jeweils andere Informationen vermitteln (vgl. *Abbildung 1*). Wenn wir einen gerichteten Graphen zeichnen, haben die Kanten eine Richtung, die durch einen Pfeil angezeigt wird.

⁹ Wettlaufer 2016.

¹⁰ Baillot / Busch 2019, S. 26.

¹¹ Gramsch 2016, S. 85.

¹² Gerade der Bereich von Linked Data findet allerdings in letzter Zeit mehr Aufmerksamkeit, vgl. Baas et al. 2021; Koho et al. 2020; Wettlaufer 2018.



Abb. 1: Verschiedene Darstellungen desselben Graphen. Jede Darstellung vermittelt visuell andere Informationen, die darunterliegenden mathematischen Strukturen bleiben allerdings identisch. [Dörpinghaus 2022]

Klassische Fragestellungen der (algorithmischen) Graphentheorie lassen sich grob in lokale und globale Probleme unterteilen (vgl. Abbildung 2).¹³ Lokale Probleme betrachten in jedem Schritt stets nur einen Knoten und beispielsweise seine Nachbarn. Dies betrifft etwa die Suche nach kürzesten Wegen (englisch *shortest paths*) oder die Suche nach einfachen Mustern (engl. *pattern matching*). Globale Probleme benutzen neben den lokalen Strukturen auch weitere Informationen des Graphen, so z. B., die *Graphdurchmusterung* (Breitensuche, Tiefensuche), die auch die Informationen über schon besuchte Knoten berücksichtigt. Weitere Beispiele sind die *Wegesuche*, *Minimale Spannbäume*, *Zentralitätsmaße*, *Subgraphisomorphismen* und *Community-Detection*. Einige Fragestellungen wie Zentralitätsmaße und Community-Detection sind dabei aus der sozialen Netzwerkanalyse entstanden.

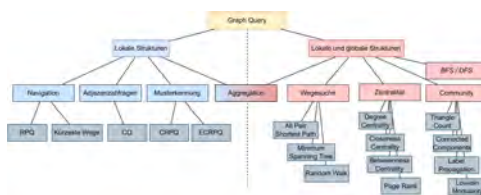


Abb. 2: Ein Überblick über die Kategorien von Graph Queries bzw. Graphenabfragen. Diese Kategorien geben einen ersten Überblick, auch über deren (Zeit-)Komplexität: RPQ ist PSPACE-vollständig, CRPQ und ECRPQ (in der Abbildung unter CQ zu finden) sind EXSPACE-vollständig, vgl. Bonifati / Dumbava 2019. Zentralitätsmaße für Wissensgraphen sind ebenfalls recht komplex. Für einige Probleme gibt es effiziente Algorithmen, vgl. Grando et al. 2016, aber einige spezifischere Probleme sind bekanntermaßen NP-vollständig, z. B. Group Closeness Maximization (GCM) oder Maximum Betweenness Centrality, vgl. Chen et al. 2016.) [Dörpinghaus 2022]

Neben einer Kantenrichtung in gerichteten Graphen können auch beliebige weitere Daten in Kanten und Knoten gespeichert werden. In einer Visualisierung könnten z. B. weitere Beschriftungen von Eigenschaften dargestellt werden. Daraus ergibt sich auch der englischsprachige Begriff des Labeled Property Graph (LPG). Dieser ist wieder definiert als Graph $G = (V, E)$ bestehend aus einer Menge von Knoten V (auch Wissensobjekte genannt) und Kanten E (auch Verknüpfungen genannt). Eine Kante steht immer in Beziehung zu genau zwei Knoten mit einer festen Richtung von einem Start- zu einem Endknoten, wodurch der LPG als gerichteter Graph definiert wird. Sowohl Knoten als auch Kanten können eine Reihe von *Schlüssel-Wert-Paaren* speichern, die als Eigenschaften bzw. ihre Werte als Labels bezeichnet werden.

Dies ist allerdings eine sehr stark von der Informatik geprägte Definition. Noch allgemeiner kann ein Wissensgraph als Graph $G = (E, R, \lambda)$ definiert werden. Hierbei finden sich Entitäten $e \in E = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n$. Die Elemente E_i sind sogenannte Layer, die z. B. aus formalen Strukturen wie Ontologien oder Taxonomien stammen. Weiter gibt es Relationen R und eine beschreibende Funktion $\lambda: E \cup R \rightarrow \Sigma$, die allen Knoten und Kanten bestimmte Beschreibungen aus Σ zuweisen kann. Knoten und Kanten können also mit einigen zusätzlichen Metainformationen versehen sein, die im Hinblick auf die Anwendung des Wissensgraphen definiert werden müssen.

Dabei bestehen die Relationen $R = \{R_1, \dots, R_n\}$ aus einer Liste von entweder inter-ontologischen (zwischen Knoten aus demselben Layer) oder intra-ontologischen Relationen (zwischen Knoten aus anderen *Layern*). Sowohl E als auch R sind endliche diskrete Räume (vgl. Abbildung 3).

¹³ Zur genauen Herleitung, vgl. Dörpinghaus / Stefan 2020.



Abb. 3: Darstellung eines biomedizinischen Wissensgraphen mit verschiedenen Layern (dargestellt durch verschiedene Farben), Relationen (Benennung auf den Kanten) und Labeln (Beschriftungen auf den Knoten). Es finden sich sowohl Kanten zwischen Knoten desselben Layers, als auch Kanten zwischen Knoten verschiedener Layer. [Dörpinghaus 2022]

2.2 Die Perspektive des Semantic Web

Das Semantic Web geht auf Tim Berners-Lee zurück¹⁴. Er beschreibt das Ziel, Informationen im World Wide Web automatisch computerbasiert interpretieren zu können. Objekte, die im Web beschrieben werden, sollen eine eindeutige URI als Link erhalten, über welche ihre Informationen abrufbar sind. Weiter sollen bei Objekten semantische Metainformationen abgelegt sein, die Aufschluss über ihre Bedeutung, ihren Kontext oder ihre Relationen zu anderen Inhalten ermöglichen.

Damit eng verwandt ist das Konzept von *Linked Open Data*. Es bezeichnet Daten, die durch ihre semantischen Metainformationen miteinander verknüpft sind und in einer bestimmten Form, idealerweise frei zugänglich veröffentlicht werden. Hinter dieser Idee verbirgt sich letztlich das Konzept eines Wissensnetzwerks, das das online publizierte Wissen semantisch verknüpft. Tim Berners-Lee führte auch die Linked Data Principles ein¹⁵, in denen er für die Verwendung einiger standardisierter Technologien und Praktiken plädiert.

Technisch baut das Semantic Web auf das *Resource Description Framework* (RDF)¹⁶ auf. Es wurde 2004 eingeführt, um Inhalte des Internets zu beschreiben und für den Aufbau des Semantic Web maschinell interpretierbar zu machen¹⁷. RDF beschreibt die Regeln zur Formulierung der dafür nötigen Metadaten. Dabei werden alle RDF-Informationen in *Tripeln* (Subjekt-Prädikat-Objekt) abgelegt. Die drei Bestandteile dieser Tripel können beliebige Ressourcen sein, welche an anderer Stelle definiert oder beschrieben werden. Zur eindeutigen Identifizierung der drei Elemente im größeren Kontext des Semantic Web werden *Internationalized Resource Identifier* (IRI) verwendet, um RDF-Beschreibungen wiederverwendbar und zugänglich gestalten zu können.

Um durch RDF beschriebene Informationen abzufragen, wurde die *Query Language SPARQL* entwickelt¹⁸. Sie stellt ein Datenzugriffsprotokoll für das Semantic Web bereit. SPARQL findet die gewünschten Tripel, indem die Muster in der Abfrage mit Tripeln in den Datensätzen abgefragt werden.

Damit entspricht das Konzept dem von LPGs. Mittels LPGs und Graphdatenbanken (die z. B. mit *Cypher* abgefragt werden können) können allerdings zusätzlich auch *Kanteneigenschaften* abgefragt und berücksichtigt werden. Das ist mit SPARQL nicht möglich. RDF ist somit ein sehr einfaches Datenmodell, das im Kern nur binäre Beziehungen zwischen Subjekt und Objekt unterstützt. Cypher ist wiederum ein Beispiel für eine deklarative Abfragesprache zur Erzeugung, Änderung und zum Abfragen von LPGs. Cypher unterstützt auch *Projektion*, *Aggregation* und die Angabe variabel langer *Pfade*.¹⁹

¹⁴ Vgl. Berners-Lee et al. 2001.

¹⁵ Vgl. Berners-Lee 2006.

¹⁶ Vgl. Lassila et al. 1999.

¹⁷ Hierbei handelt es sich um das *RDF Schema* (RDF-S). Es drückt Klassen- und Hierarchiestrukturen aus und enthält verschiedene Literale sowie konkrete Klassen. Durch die bewusst allgemeinen Definitionen ist RDF-S weiterhin sehr flexibel und kann zur Beschreibung unterschiedlichster Modelle genutzt werden.

¹⁸ Sie wird seit 2006 von der RDF Data Access Working Group (DAWG) des World Wide Web Consortiums entwickelt und standardisiert. SPARQL ist der Nachfolger mehrerer Abfragesprachen, wie z. B. der RDF Query Language.

¹⁹ Vgl. Saake et al. 2018.

Auf RDF und RDF-S basiert die *Web Ontology Language (OWL)*²⁰, welche die Beschreibung von Ontologien durch Tripel ermöglicht. OWL definiert dabei keine Strukturen neu und kann als Format für Ontologiestrukturen angesehen werden. Dabei entsprechen diese Ontologien einer digitalen Version des oben schon diskutierten klassischen Ontologiekonzeptes. Über Ontologien ist es z. B. auch möglich, logische Schlussfolgerungen zu bilden. Um logische Beschränkungen über die Klassenstrukturen zu stellen, werden *Axiome* definiert. Dies sind Beschränkungen, die für alle Instanzen der Klassen gelten, die in einem gemeinsamen Modell auftreten. Das Modell der Ontologie kann damit sehr komplexe Sachverhalte abbilden, was zum Beispiel für viele Anwendungen der biomedizinischen Forschung auch tatsächlich ausgeschöpft wird. Allerdings geht das Hand in Hand mit einer hohen Komplexität des Datenmodells, die für andere Anwendungszwecke unerwünscht ist. So ist es nicht verwunderlich, dass in der Praxis oft weniger komplexe Datenstrukturen verwendet werden²¹.

Nach diesen beiden Ansätzen, die den praktischen und theoretischen Horizont aus Sicht der Graphentheorie und der Informatik aufgespannt haben, soll nun der Fokus auf Netzwerkansätze in den Geistes- und Sozialwissenschaften gelegt werden.

2.3 Netzwerkansätze in den Geistes- und Sozialwissenschaften

Netzwerkansätze haben schon seit mehreren Jahrzehnten sowohl in der Theorie als auch in der Anwendung Einzug in die Geistes- und Sozialwissenschaften, etwa in die Geschichtswissenschaften und Archäologie (historische Netzwerkforschung), Ethnografie²² oder Sprachwissenschaften, gehalten. Zunächst soll die soziale Netzwerkanalyse (englisch *Social Network Analysis*, SNA) dargestellt werden, die versucht, menschliche Interaktionen in einen analytischen und auswertbaren Zusammenhang zu bringen. In den Sozialwissenschaften war zuvor eine rein enumerative Forschung üblich. Dabei ergaben sich vom methodischen Schritt von der Theoriebildung zur empirischen Forschung Probleme:

»Auf der empirisch-praktischen Ebene hat dieser Gegensatz jedoch zunächst keine Entsprechung mehr: Allenfalls die Forschungsfrage – aus der (Gesamt-) Netzwerk- bzw. (Einzel-) Akteurperspektive herausgestellt – reflektiert noch mögliche Unterschiede, die insofern auf die Beziehung zwischen abhängiger und unabhängiger Variable reduziert werden.«²³

Eine umfassende historische Analyse der Netzwerkforschung im Bereich der Sozialwissenschaften findet sich bei Stegbauer²⁴ oder bei Rollinger, der insbesondere den paradigmatischen Wechsel durch den Netzwerkbegriff betont²⁵. Die Entwicklung begann im Wesentlichen in den 1940er Jahren als *Soziometrie* und hatte in den 1970er Jahren ihren Durchbruch in den USA.

Noch einfacher definieren Biegel et al. ein Netzwerk als Verbindungen einer Einzelperson zu *signifikant Anderen* – also weiteren Personen wie Familie, Freunden etc.²⁶ Dabei ist deutlich, dass die Interpretation der Verbindung und der signifikant Anderen offen ist. Damit folgt, dass soziale Beziehungen und Gruppen sowie deren Verbindung und somit Strukturen sichtbar gemacht werden können.²⁷ *Starke* und *schwache Bindungen* wurden terminologisch in der Arbeit von Granovetter eingeführt²⁸. Nach Granovetter gilt für drei Personen A, B und C, dass »je stärker die Freundschaftsbeziehung zwischen den Personen A und B und den Personen A und C ist, umso wahrscheinlicher ist, dass sich B und C kennen oder kennenlernen werden.«²⁹ Ob gerade schwache oder starke Beziehungen für die Verbreitung neuer Ideen wichtig sind, wird in der Literatur kontrovers diskutiert³⁰.

²⁰ Vgl. Hitzler et al. 2012.

²¹ Auf Terminologien basierende Anwendungen definieren beispielsweise häufig keine inhaltlichen Relationen und benötigen keine ausführliche Annotation ihrer Objekte mit diversen Metadaten. Sie bilden keine Modelle aus Instanzen und wenden auch keine logischen Argumentationen auf ein Modell an.

²² Vgl. Verne 2013.

²³ Schubert 1994, S. 9.

²⁴ Vgl. Stegbauer / Häußling (Hg.) 2010.

²⁵ Vgl. Rollinger 2014. Wichtiger Vordenker war vor dem Ersten Weltkrieg Georg Simmel, der die Wechselwirkung zwischen Gruppen und ihrem Einfluss auf das Individuum studierte. Ihm folgte Leopold von Wiese, der ebenfalls primär auf Beziehungen und ihre Auswirkungen einging. Bis zur Systematisierung der Netzwerkanalyse in den 1940er Jahren kamen die Impulse vor allem von Soziologen, aber auch von Ethnologen. Insbesondere Alfred Radcliffe-Brown definierte den Gegenstand der Ethnologie nicht als Kultur, sondern als soziale Strukturen.

²⁶ Vgl. Biegel et al. 1985.

²⁷ Vgl. Hennig 2006.

²⁸ Vgl. Granovetter 1973.

²⁹ Stegbauer / Häußling (Hg.) 2010. In seiner Arbeit findet sich eine Definition und auch eine Auflistung von Unterscheidungsmerkmalen von starken und schwachen Bindungen. Diese können am besten bei der Erforschung der Integration von Einzelpersonen in ein Gesamtnetzwerk genutzt werden.

³⁰ Vgl. z. B. Collar 2013 gegen Schweizer 1996.

Netzwerkanalysen können zum einen auf verschiedenen Ebenen, z. B. mit einer sehr globalen Perspektive, ausgeführt werden. Dabei sind geografische Komponenten (Städte, Länder, Provinzen, Fundorte, ...) Gegenstand der Analyse. Auf der anderen Seite können sie klassisch auf persönlicher Ebene ausgeführt werden. Dabei sind Personen Gegenstand der Analyse. Hier wird schon deutlich, dass in diesem Netzwerkansatz nicht nur eine einzige Entität bzw. ein einziger Datentyp verarbeitet wird. Die Konstruktion und Analyse dieser Netzwerke setzt mehrere Layer mit verschiedenen Daten, etwa Personen oder Orte, voraus.

Netzwerkanalysen setzen im Allgemeinen zwei Mindestanforderungen voraus: Zum einen eine endliche Menge von Personen bzw. Akteur*innen und zum anderen mindestens eine soziale Beziehung, die für die Personen untereinander nachgewiesen werden kann. Als Beispiele können der Handel mit ökonomischen Ressourcen wie Arbeit, Kapital oder Waren genannt werden, aber auch Machtausübung, Übermittlung von Informationen, Heirat, Freundschaft oder soziale Unterstützung. Dabei kann nicht vorausgesetzt werden, dass ein bestimmtes Netzwerk mit wiederkehrenden Mustern von Verbindungen und Nicht-Verbindungen entsteht. Denn: »Das Fehlen von Beziehungen ist diagnostisch mindestens so bedeutsam wie das Vorhandensein von Beziehungen.«³¹ Zur Analyse der Netzwerke kann nicht nur auf die Methoden der Graphentheorie, sondern auch der Statistik zurückgegriffen werden. So lassen Zentralitätsmaße einen Rückschluss über die Position einer Person in einem sozialen Netzwerk zu.³² Das Zentralitätsmaß eines/einer Akteurs/Akteurin kann z. B. die Einflussnahme auf das gesamte Netzwerk definieren. Aber je nachdem wie man das Zentralitätsmaß operationalisiert, führt dieser Vorgang zu unterschiedlichen Ergebnissen. Exemplarisch können dafür die *Betweenness Centrality* (*Betweenness-Zentralitätswert*) und die *Eigen Centrality* (auch: *Eigenvector Centrality*, *Eigen-Zentralität*) angeführt werden. Letztere zeigt eher indirekte Einflussmöglichkeiten.

Es ist eine neuere Entwicklung, dass die SNA auch in den Geschichtswissenschaften verwendet werden. Reitmayer und Marx bieten eine aufschlussreiche Zusammenstellung der Verwendung von Netzwerkansätzen in der Geschichtswissenschaft³³. Sie bemerken eine ungleiche Verwendung von Methoden sowie deren Verbreitung. »Besonders früh scheinen anglo-amerikanische Historiker Konzepte der Netzwerkanalyse aufgegriffen zu haben, während dieser Trend in Deutschland deutlich später eingesetzt hat«³⁴. In den Geschichtswissenschaften würden lediglich ausgewählte Einzelverfahren der Netzwerkanalyse verwendet und bekannte Argumentationsfiguren und Grundannahmen übernommen. Eine Netzwerkanalyse im strengen sozialwissenschaftlichen Sinne würde nicht ausgeführt.

Auch in der Archäologie werden Netzwerkansätze genutzt, um soziale Strukturen zu evaluieren. Dabei liegt der Fokus beispielsweise auf Siedlungsstrukturen, sozialen Hierarchien oder der Analyse von Schriftstücken. Collar hat beispielsweise schon 2013 als Archäologin mit den Methoden der SNA einen Schritt in Richtung Religionswissenschaften getan³⁵. In ihrer Arbeit *Religious Networks in the Roman Empire* untersucht sie, warum sich einige Kulte und Religionen innerhalb des römischen Reiches bei gleicher Popularität entweder durchsetzten oder bedeutungslos wurden.

Knappett beschreibt die weitere Anwendung von Netzwerkansätzen in der Archäologie³⁶. Handelsnetzwerke, Austauschnetzwerke und Straßennetzwerke tragen als ganz allgemeine Netzwerke zum Verständnis der Geschichte bei.

Für eine interdisziplinäre Perspektive ist besonders die Beobachtung Schuberts zu berücksichtigen: Es »scheinen [...] Netzwerkforscher eines gemeinsam zu haben: Die Abkehr von der großen, monolithischen Theorie im Singular und die pragmatische Orientierung an den realen Gegebenheiten im Plural.«³⁷ Er begründet dies mit dem Interesse an globalen Strukturen, bei einer gleichbleibenden (lokalen) Datengrundlage. Doch wie passt dies zusammen? Um das genauer zu diskutieren, sollen zunächst verschiedene methodische Arten, Netzwerkansätze zu definieren, dargestellt werden, wobei jeder Schritt den vorherigen methodisch beinhaltet. Zunächst orientieren wir uns an Schnegg, der für die SNA folgende Unterteilung vornimmt:

»(1) die Analyse der sozialen Beziehungen zwischen Akteuren als wichtiger Bestandteil gesellschaftlicher Ordnung, (2) die systematische Erhebung und Auswertung empirischer Daten, (3) die graphische Präsentation dieser Daten und (4) mathematische und computergestützte formale Modelle, um zu Abstraktionen dieser Daten zu gelangen«³⁸

³¹ Schweizer 1996, S. 159.

³² Weiterführende Informationen zu den Zentralitätsmaßen finden sich bei Freeman 1978, oder auch Collar 2013.

³³ Vgl. Reitmayer / Marx 2010.

³⁴ Reitmayer / Marx 2010, S. 869.

³⁵ Vgl. Collar 2013.

³⁶ Vgl. Knappett 2013.

³⁷ Schubert 1994, S. 9.

³⁸ Schnegg 2010.

Diese vierfache Charakterisierung bezieht sich auf die Verwendung von Methoden aus der Informatik und deren Rückkopplung oder Dialog mit dem ursprünglichen Forschungsbereich. Sie begegnet uns in allen Netzwerkansätzen³⁹. Man kann den Ansatz von Schnegg wie folgt verallgemeinern:

1. Die Verwendung von Modellen, die von Methoden der Digital Humanities (DH) abgeleitet sind, um Hypothesen zu bewerten oder neue Hypothesen in einer Geistes- oder Sozialwissenschaft zu generieren oder bei einer digitalen Modellierung die theoretischen Modelle und Hypothesen der jeweiligen Fachrichtung zu berücksichtigen.
2. Die Verwendung von Modellen und Methoden aus den DH zur Arbeit mit empirischen Daten im Bereich einer Geistes- oder Sozialwissenschaft.
3. Die Anwendung von Methoden aus dem *Visual Computing* (z. B. Visualisierung und interaktive Tools) zur Erklärung, Darstellung und Diskussion der bei der Anwendung von in (2) generierten Ergebnisse.
4. Erstellung eines mathematischen und/oder computergestützten Modells, das die Daten aus (2) abstrahiert, um neue Modelle oder Methoden innerhalb des Fachgebiets oder der DH zu entwickeln.

Alle Kategorien dieses Schemas schließen die vorangegangenen Kategorien ein. Das bedeutet zum Beispiel, dass die Anwendung von Modellen und Methoden auf empirische Daten (2) die Anwendung und theoretische Reflexion bestehender Modelle und Methoden (1) einschließt. Diese Kategorien umfassen Methoden und Ansätze der DH auf einer anderen Ebene. Zur Veranschaulichung des Schemas werde ich einige kurze Beispiele aus dem Bereich der sozialen Netzwerkanalyse (SNA) in verschiedenen Geistes- und Sozialwissenschaften diskutieren.

1. In dieser Kategorie werden die sozialen Beziehungen zwischen Akteur*innen untersucht, d. h. zwischen Individuen oder Institutionen und anderen Entitäten. Hier wurden noch keine empirischen Daten erhoben. Dazu gehören vor allem Arbeiten, die Methoden und Ideen der SNA und anderer Netzwerkansätze nutzen, um Theorien oder Modelle zu entwickeln und diese in eine argumentative Auseinandersetzung mit anderen Fragestellungen zu bringen.

In diese Kategorie fällt zum Beispiel die frühe Arbeit des Theologen Michael B. Thompson aus dem Jahr 1998⁴⁰. Er analysiert den Informationsfluss der Nachfolger Jesu im 1. Jahrhundert nach Christus, was er als »Holy Internet« bezeichnet. Dabei arbeitet er lediglich implizit mit Methoden der SNA. Sein Verdienst liegt vor allem in einer ausführlichen Zusammenstellung der Aspekte, die zum Kommunikationsnetzwerk führen. Ähnlich ist die Arbeit des Theologen Rikard Roitto, der den Informationsfluss, der durch die drei Johannesbriefe in ein Netzwerk von johanneischen Gemeinden ausgeht, analysiert⁴¹. Dabei stellt der Autor bewusst nur verschiedene Modelle zu einem möglichen Verständnis zusammen und stellt deutlich klar, dass es ihm nicht um eine historische Rekonstruktion geht. Hier leuchtet das oben schon angesprochene Quellenproblem auf.

2. Diese Kategorie kann kaum gefüllt werden, da in der Regel bei empirischen und computerbasierten Daten auch Methoden der Visualisierung verwendet werden⁴².

3. Einige Geisteswissenschaften wie die Geschichtswissenschaften, Philologie, Germanistik oder die Theologie, sind in der Regel keine empirischen Wissenschaften, aber empirische Daten können z. B. exegetisch oder mit Methoden von *Text Mining* und *Data Mining* anhand von Texten oder anderen Gegenständen generiert werden. Wir sehen hier zwei Hauptmerkmale: das Sammeln empirischer Daten und ihre Visualisierung.

Als Beispiel für diese Kategorie kann ein Visualisierungstool angeführt werden, das einen Einblick in den Tagebuchkorpus der Gedenkstätte Bergen-Belsen bietet, welche Dutzende von Tagebüchern von KZ-Häftlingen beinhaltet und diese somit als interoperable Daten mit sozialen Netzwerken verbindet⁴³. Andere Ansätze visualisieren und analysieren historische Karten als interoperable Daten⁴⁴, die Kommunikation und Netzwerkstruktur des *Jesus Movement*⁴⁵, oder mittelalterliche Textkorpora⁴⁶, um eine explorative Arbeit mit den Texten zu ermöglichen. Hier verschwimmen auf der einen Seite implizite Netzwerkansätze, die interoperable Daten beinhalten, und explizite Netzwerkansätze wie die SNA. Auf der anderen Seite nähern wir uns bereits der methodischen Grenze zur nächsten Kategorie.

³⁹ Vgl. Dörpinghaus 2021; Dörpinghaus 2022.

⁴⁰ Vgl. Thompson 1998.

⁴¹ Vgl. Roitto 2019.

⁴² Diese Kategorie ist quasi ein Erbe der ursprünglichen Kategorisierung von Stegbauer / Häußling (Hg.) 2010. Trotzdem ist es sinnvoll, diese Kategorie als methodischen Zwischenschritt nicht zu ignorieren. Für eine Methodenkritik siehe auch die Arbeit von Drucker 2015.

⁴³ Vgl. Khulusi et al. 2022.

⁴⁴ Vgl. Reckziegel et al. 2021.

⁴⁵ Vgl. Duling 2013; Duling 2000; Duling 1999.

⁴⁶ Meinecke et al. 2020.

4. In dieser Kategorie gehen wir einen Schritt weiter, zu heuristischen Modellen, die formal computergestützte Modelle sind. Es handelt sich somit auch um mathematische Modelle im Sinne der Graphentheorie. Eine Datengrundlage finden diese Ansätze in den vielfältigen Digitalisierungsprojekten, die das kulturelle Erbe nachhaltig verfügbar machen.

Dabei können auch Beziehungen zwischen verschiedenen Quellen in die Modelle als Layer aufgenommen werden, z. B. um Musikinstrumente mit historischen Aufführungen von Musikstücken in Beziehung zu setzen⁴⁷. Auch hier ist die Grenze zwischen der expliziten Nutzung von Wissensgraphen und interoperablem Wissen, das nur implizit ein Netzwerk bildet, fließend. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Visualisierungsansätze, die z. B. zeit- und ereignisbasierte Wissensgraphen auf gebogenen Zeitachsen darstellen und daraus neue Modelle generieren⁴⁸. Auch in der Archäologie findet die Frage nach Modellen immer mehr Beachtung,⁴⁹ gleiches gilt für die historische Netzwerkanalyse⁵⁰.

Je nach Perspektive, je nachdem, wie breit wir das Feld der Netzwerkansätze und der interoperablen Daten sehen, finden wir mehr oder weniger Literatur und Wissenschaftler*innen, die Netzwerkansätze verwenden. Dies erklärt, warum die Verbreitung der Verwendung von Netzwerkansätzen unterschiedlich wahrgenommen werden kann.

Nach dieser Bestandsaufnahme in allen Disziplinen soll zunächst ein Blick ›zurück‹ geworfen werden. In einem Forschungsüberblick über die Graphentheorie soll insbesondere die interdisziplinäre Verwendung von Netzwerkansätzen thematisiert werden, denn hier gibt es interessante Wechselwirkungen die für die Abschnitte 4 und 5 relevant sind. Im Anschluss soll dort der Blick anhand von ausgewählten Beispielen aus den (digitalen) Geistes- und Sozialwissenschaften ›nach vorne‹ gerichtet werden. Durch diese thematische Einklammerung ergeben sich nicht nur fortlaufende Themen, sondern auch neue thematische Impulse.

3. Forschungsüberblick zur Graphentheorie

Die Graphentheorie ist ein relativ junges Feld in der Mathematik und die Impulse zu ihrer Entwicklung gingen anfangs primär von praktischen Problemstellungen aus⁵¹. Das Fach liegt an der Schnittstelle zur Informatik, die sich allerdings erst nach dem Zweiten Weltkrieg neben der Mathematik als eigenständiges Fachgebiet etabliert hat. Dabei ist die Analyse von Strukturen die eher mathematische Perspektive, während die algorithmische und verarbeitende Analyse die eher informatische Perspektive ist. Es ist nicht verwunderlich, dass das anschauliche Konzept von Graphen bzw. Netzwerken sehr zügig auch in anderen Disziplinen aufgegriffen wurde. Zu nennen sind hier neben verschiedenen Naturwissenschaften gerade die Sozialwissenschaften⁵², die Ethnografie⁵³, später auch die Archäologie, Geschichts- und Literaturwissenschaften⁵⁴. Weitere Überschneidungen ergeben sich, wenn Methoden aus der Informatik bzw. den Data Sciences in den Geisteswissenschaften verwendet werden⁵⁵.

Doch wo liegen nun die Ursprünge des Netzwerkgedankens und der Graphentheorie? Robin Wilson fasst zusammen:

The origins of graph theory are humble, even frivolous. Whereas many branches of mathematics were motivated by fundamental problems of calculation, motion, and measurement, the problems which led to the development of graph theory were often little more than puzzles, designed to test the ingenuity rather than to stimulate the imagination. But despite the apparent triviality of such puzzles, they captured the interest of mathematicians, with the result that graph theory has become a subject rich in theoretical results of a surprising variety and depth.⁵⁶

Die Graphentheorie ist dem Teilbereich der diskreten Mathematik zuzuordnen, die sich mit abzählbaren (bzw. abzählbar unendlichen) Mengen beschäftigt. Es ergibt sich eine große Schnittmenge zu den Disziplinen der Kombinatorik und Optimierung. Letztere wurde vor allem in der Neuzeit durch die Entstehung technischer und elektronischer Hilfsmittel immer bedeutender. Dabei bietet die Kombinatorik sicherlich das umfangreichste Material für eine ausführliche historische Darstellung. Kombinatorische Strukturen finden sich unter anderem im antiken China, Indien und Griechenland⁵⁷. Es finden sich eine

⁴⁷ Vgl. Kusnick et al. 2020.

⁴⁸ Vgl. Filipov et al. 2021.

⁴⁹ Vgl. den Review von Peeples 2019.

⁵⁰ So z. B. Dörpinghaus 2020; Massey 2016; McClure 2016.

⁵¹ Vgl. Diestel 2012; Wußing 2009.

⁵² Vgl. Biegel et al. 1985; Granovetter 1973; Stegbauer / Häußling (Hg.) 2010.

⁵³ Vgl. beispielsweise Kaplan 1976; Schweizer 1996.

⁵⁴ Zu nennen sind hier unter anderem Collar 2013; Knappett 2013; Reitmayer / Marx 2010; Rollinger 2014.

⁵⁵ Vgl. beispielsweise Ciula / Eide 2017; Murray / Tillett 2011; Thaller 2021.

⁵⁶ Wilson 1999, S. 503.

⁵⁷ Vgl. Wilson / Watkins 2013.

erstaunliche Vielfalt der Anwendungsfelder über klassische Beispiele wie das Pascalsche Dreieck hinaus, etwa in der Poesie (Auswahl, Anordnung und Kombination von Silben im Sanskrit, chinesischen Hexagrammen, lateinischer und griechischer Prosodie) oder in der Musik (Notenfolgen in Liedern).

Doch auch wenn die Überschneidungen zwischen Kombinatorik und Graphentheorie groß sind, so ist doch die Frage zu stellen, welchen Werdegang diese Disziplin hat. Mulder fasst die Problematik zusammen: »Wir müssen hier bemerken, daß das Studium der Geschichte der Graphentheorie, im Gegensatz zu dem der anderen mathematischen Disziplinen, nur seit kurzem auf ernsthafte Weise betrieben wird.«⁵⁸ Dabei ist zum einen zu unterscheiden zwischen dem Aufkommen des Begriffs des Graphens, der nicht vor 1878 auftrat, und der Entstehung des Netzwerkgedankens bzw. der formalen mathematischen Methoden, die mit Leonhard Euler und dem Jahr 1736 verbunden sind⁵⁹.

»Indeed, Euler's solution for the problem of Königsberg bridges has long been recognized as a prehistory of graph theory and, more generally, analysis situs. However, in that case, historians and mathematicians needed to have graph theory and analysis situs to be able retrospectively to situate Euler's solution in its appropriate context.«⁶⁰

Wir werden zunächst den aktuellen Forschungsstand darstellen und anschließend der Frage nachgehen, inwiefern die Idee des Graphens bzw. Netzwerks auch ohne die mathematische Perspektive präsent war.

Gießmann setzt seine Beobachtungen erst im 19. Jahrhundert an: »Der Aufstieg der Netzwerke als Praxis und Denkstil begann zwar schon in früher Neuzeit und Aufklärung, war dort aber vor allem mit der Epistemologie des Lebendigen verbunden.«⁶¹ Und auch Wußing setzt zwar richtig den Anfang der modernen Graphentheorie mit Leonhard Euler und dem Königsberger Brückenproblem (1736) gleich⁶², aber es bleiben offene Fragen:

»Formell wäre Graphentheorie als Netzwerktheorie schon wesentlich früher breit auf Phänomene in Natur, Technik und Gesellschaft anwendbar gewesen. Dass dies erst im 20. Jahrhundert geschieht und dann, sozusagen in aller Kontingenz verspätet, Zeichenpraktiken und Lebenswelt massiv kurzgeschlossen werden, provoziert weitere Fragen.«⁶³

Liegt das Aufkommen der Netzwerkanalysen und der Graphentheorie allein darin begründet, dass sich die Wissenschaft verändert und »la thorie des graphes rpond un besoin assez gnral de la pense logique«⁶⁴? Dies wird kaum der Fall gewesen sein, wie vielfältige Beispiele zeigen: Im frühen 19. Jahrhundert wurde der Ungar Emil Torday im Kongo mit einem Kinderspiel bekannt: Ziel war das Zeichnen von Netzwerkstrukturen im Sand ohne den Finger heben zu müssen oder existierende Linien zu kreuzen⁶⁵. Dies entspricht einem graphentheoretischen Problem: Jeder Graph mit genau zwei ungeraden Knoten kann durch einen einzigen Pfad durchschritten werden: »Most drawings of this type belong to a long tradition [...]. They refer to proverbs, fables, games, riddles, animals, etc., and play an important role in the transmission of knowledge and wisdom from one generation to the next.«⁶⁶ Doch auch abseits von Spielen repräsentieren viele graphentheoretische Probleme Alltagsprobleme, etwa kürzeste Wege. Alexander Schrijver beobachtet dazu:

»It is difficult to trace back the history of the shortest path problem. One can imagine that even in very primitive (even animal) societies, finding short paths (for instance, to food) is essential. Compared with other combinatorial optimization problems, like shortest spanning tree, assignment and transportation, the mathematical research in the shortest path problem started relatively late.«⁶⁷

Auch Aristoteles beschrieb in seiner *Historia animalium* (Περὶ τὰ ζῷα ἰστορία, 4. Jahrhundert vor Christus) schon die Notwendigkeit, die Tierwelt in ein Ordnungsschema einzuordnen: Vögel, Fische, Wale als Bluttiere; Schalthiere, Krebstiere; Cephalopoden und Sepien; Insekten⁶⁸. Nach ihren Körperflüssigkeiten – rotes Blut und Serum – unterteilt er »die beiden Gruppen, die gemessen an der heutigen Zoologie taxonomischen Charakter besitzen, weiter in sogenannte Größte Gattungen [...] ein. Auch sie stellen absolute Ordnungs- und Klassifikationsgrößen dar.«⁶⁹ Im praktischen Sinne ergeben sich für Aristoteles – der

⁵⁸ Mulder 1992, S. 296.

⁵⁹ Vgl. Gross / Yellen 2003, S. 31.

⁶⁰ Chemla 2014, S. 369.

⁶¹ Gießmann 2008, S. 269.

⁶² Vgl. Wußing 2009.

⁶³ Gießmann 2008, S. 270.

⁶⁴ Mayer 1976, S. 55.

⁶⁵ Vgl. Zaslavsky 1999, S. 105–109.

⁶⁶ Gerdes 1994, S. 355.

⁶⁷ Schrijver 2012, S. 155.

⁶⁸ Γένη δὲ μέγιστα τῶν ζῷων, εἰς ἃ διήρηται τὰλλα ζῷα... Aristotle 1837.

⁶⁹ Aristoteles 2013, S. 236–237.

Leben also als hierarchisch wahrnehm – aber Probleme, die er nur mit partiellen Definitionen lösen konnte⁷⁰. Auch einer seiner Schüler, Theophrast, arbeitete in seinen Schriften *Histona plantarum* und *Causae plantarum* mit Taxonomien in der Botanik und unterteilt zwischen Bäumen, Sträuchern, Halbsträuchern und Kräutern⁷¹. Interessanterweise ist die weitere Forschung in diesem Bereich spärlich⁷² und erst durch das Wirken Carl von Linné – basierend auf den Arbeiten von Andrea Cesalpino und Gaspard Bauhin – wurde eine bis heute gültige Systematik von Pflanzen erarbeitet⁷³. Dabei befinden wir uns derzeit im nächsten Transformationsschritt: Nicht nur das Denken und Modellieren in Netzwerken ist möglich, sondern auch das computerbasierte Auswerten dieser Daten:

»the recent increase in the amount and availability of biological data has placed a new focus on the complex networks embedded in biological systems. The increased availability of computational tools to store and retrieve biological data has facilitated wide access to these data, not just by biologists but also by specialists from the social sciences, computer science, physics and mathematics. This fusion of interests has led to a burst of research on the properties and consequences of network structure in biological systems.«⁷⁴

Auch wenn damit nun die Dinge benannt sind, die dem Thema der Netzwerkanalyse bzw. Graphentheorie Aufschwung verleihen, ist doch der Anfang dieser Disziplin weiter unklar. Denn auch z. B. Coward irrt hier mit seiner Kritik am Netzwerkdanken, wenn er Netzwerke als Konstrukt des 19. Jahrhunderts ansieht⁷⁵. Grundsätzlich schweigen die Quellen aber zu Taxonomien bzw. baumartigen Strukturen: »the historical record of that topic before the advent of computers is virtually a blank page, with the exception of a few 19th-century papers«⁷⁶. So ist es wenig überraschend, dass viele graphentheoretische Konzepte – ihrer Zeit voraus – schon in anderen Fachgebieten Einzug hielten: So verwendete Gustav Robert Kirchhoff im 19. Jahrhundert schon die Idee von aufspannenden Bäumen für elektrische Netzwerke⁷⁷, oder im 21. Jahrhundert die oben angesprochene implizite Nutzung von Netzwerkanalysen für das Prinzip von Linked Data in den Geisteswissenschaften.

Letztlich führten die stetig wachsende Verwendung von digitalen Methoden und die Netzwerkanalyse zu verschiedenen Paradigmenwechseln. So ist der erste Paradigmenwechsel (a) nicht nur in der Nutzung, sondern auch in der methodischen Reflexion der Netzwerke in den Geistes- und Sozialwissenschaften zu finden⁷⁸. Weiter ist zu beobachten, dass auch in den DH immer größere Datenmengen verarbeitet werden, was (b) dazu führt, dass auch der Gedanke der Datenverknüpfung bzw. Linked Data als Impuls aus dem Bereich Data Science immer wichtiger wird⁷⁹. Als letzter Punkt (c) ist das interdisziplinäre Gespräch mit der Graphentheorie zur kritischen methodischen Reflexion der Netzwerkanalysen anzufügen⁸⁰. Ich konnte in diesem Abschnitt zeigen, dass es die Graphentheorie als eigenständige mathematische Disziplin ohne die Impulse aus anderen Fachbereichen kaum gegeben hätte, dieses interdisziplinäre Gespräch auf der anderen Seite bisher jedoch kaum gesucht wird. Die beiden letztgenannten Punkte sollen im nächsten Abschnitt kritisch gewürdigt werden, um in Abschnitt 5 ausgewählte Beispiele zu diskutieren.

4. Interdisziplinäre Perspektiven für die Geistes- und Sozialwissenschaften

Für die Verwendung von Wissensgraphen in den Geistes- und Sozialwissenschaften, Disziplinen, die gerade durch die DH einem steten Wandel unterliegen⁸¹, gibt es einige Besonderheiten zu beachten, wie in Abschnitt 2 schon ausführlich diskutiert wurde. Trotzdem liegt die Stärke von Wissensgraphen in der einfacheren und übersichtlicheren Speicherung (vormals) unstrukturierter Daten gegenüber relationalen Datenbanken. Gerade durch diesen methodischen Schritt der Datenrepräsentation ergibt sich auch ein formales Datenschema für verknüpfte Datensätze, also Linked Data. Dies ist besonders wichtig mit Blick auf die Interoperabilität von Daten und die Reproduzierbarkeit von wissenschaftlichen Ergebnissen und hilft bei der Adressierung zentraler ethischer Maßstäbe: Reproduzierbarkeit, Transparenz, fairer und wenn möglich offener Umgang mit Daten. Hierbei

⁷⁰ » Dies bedeutet, daß Aristoteles auf eine Taxonomie der Tierarten verzichten muß. Zwar ist sein Ziel in der HA ohnehin die Vorbereitung der Apodeixis und nicht der Definition, aber zu einer vollständigen Apodeixis für die Merkmale aller Tierarten wäre eine auf umfassenden Definitionen beruhende Taxonomie sehr hilfreich, wenn sie durchführbar wäre.« Kullmann / Föllinger (Hg.) 1997, S. 45.

⁷¹ Vgl. ausführlich Wöhrle 1985; Senn 1933, S. 94.

⁷² »Eine Disziplin ›Biologie‹ gab es vor 1800 nicht, so dass Pflanzenbeschreibungen oft in Gesamtwerken und in dem Briefwechsel von Naturforschern, in kameralistischen Schriften oder in Publikationsorganen fachlich unterschiedlicher Ausrichtung versteckt sind. Beschreibungen von Theophrast, Albertus Magnus oder die der Kräuterbücher ab 1530 sind heute relativ leicht zugänglich, während Berichte arabischer Botaniker schwieriger zu beschaffen waren.« Senn 1933, S. 15.

⁷³ Vgl. Koerner 2022; Stearn 1959.

⁷⁴ Proulx et al. 2005, S. 345.

⁷⁵ Vgl. Coward 2018, S. 446.

⁷⁶ Robin Wilson / Watkins 2013, S. 32.

⁷⁷ Vgl. Walther 2013.

⁷⁸ Vgl. beispielsweise Rollinger 2020.

⁷⁹ Vgl. beispielsweise Hyvönen et al. 2019; Peeples 2019.

⁸⁰ Vgl. beispielsweise Dörpinghaus et al. 2022; de Valeriola 2021.

⁸¹ Vgl. beispielsweise die Studie von Ma / Li 2022.

ergibt sich auch ein Ausblick auf *FAIR Data*⁸²: Daten oder Metadaten sollen (1) *Findable*, (2) *Accessible*, (3) *Interoperable*, (4) *Reusable* sein. Die Bedeutung dieser Grundsätze für die DH wurde in der Vergangenheit mehrfach betont und muss an dieser Stelle nicht wiederholt werden⁸³.

Wenn im Bereich DH immer größere Datenmengen verarbeitet werden, welche Implikationen für das Netzwerkparadigma ergeben sich dann durch den aus dem Bereich Data Science stammenden Impuls der Datenverknüpfung bzw. Linked Data? Eine Besonderheit in den Geistes- und Sozialwissenschaften ergibt sich aus der Heterogenität der Disziplinen: »One characteristic of this area is the great heterogeneity of scientific disciplines and user communities involved. This leads to heterogeneity of data formats and data sources that represents a technical challenge from the point of view of interoperability.«⁸⁴ Damit lassen sich die zentralen technischen Herausforderungen im Bereich der Datenintegration und des Datenmappings lokalisieren⁸⁵. Allerdings wurde die Generierung interoperabler und wiederverwendbarer Daten schnell als zentrale Herausforderung erkannt⁸⁶ und bleibt es bis heute⁸⁷. Gerade in den skandinavischen Ländern finden sich verschiedene Lösungsvorschläge, etwa mit der *Linked Open Data Infrastructure for Digital Humanities in Finland (LODI4DH)*⁸⁸, oder verschiedenen Ansätzen im Bereich Cultural Heritage basierend auf Methoden des Semantic Webs⁸⁹ (vgl. auch weitere Lösungen aus Portugal⁹⁰ oder Schweden⁹¹).

Zwar ergibt sich aus dem Prinzip von Linked Data schon ein (Wissens-)Netzwerk, wenn die einzelnen Datenpunkte durch Knoten in einem Netzwerk repräsentiert werden und die Links Verbindungen bzw. Kanten zwischen ihnen repräsentieren⁹². Was an dieser Stelle jedoch fehlt, ist eine Abfragemöglichkeit, da die Daten nur relational abgelegt wurden, und eine Visualisierung⁹³. Dies ist insofern eine wichtige Beobachtung, da mit dieser auch der Bereich von Linked Data den Netzwerkansätzen zugeordnet werden kann und diese damit methodisch in den Geistes- und Sozialwissenschaften weiter verbreitet sind als erwartet. Im nächsten Abschnitt soll anhand von ausgewählten Beispielen dargestellt werden, welcher weitere methodische Horizont sich dadurch ergibt.

Doch die interdisziplinäre Perspektive auf Netzwerkansätze in den Geistes- und Sozialwissenschaften wäre mit diesem Impuls aus dem Bereich Data Science nicht vollständig. Es ist zu beobachten, dass gerade das interdisziplinäre Gespräch mit der Graphentheorie zur kritischen methodischen Reflexion der Netzwerkansätze führt. Um sich diesem Bereich zu nähern, ist zunächst festzuhalten, dass Netzwerkansätze neue Perspektiven eröffnen, da sie Bekanntes in einen neuen visuellen oder analytischen Kontext einbetten oder statistisch valide Aussagen über ihre Darstellung ermöglichen.

Dabei lassen sich zwei Problemfelder herausarbeiten: Zum einen ist die Frage, wie valide Aussagen aus in den Geistes- und Sozialwissenschaften oft kleinen Stichproben sind. Die andere Fragestellung ergibt sich aus der Distanz zur Datengrundlage, konkret, ob hermeneutische Vorgaben berücksichtigt oder zurückgenommen werden und ob (Text-)Aussagen aktualisiert bzw. für die gegenwartsnah operierenden Sozialwissenschaften aufbereitet werden. Die Chance liegt hierbei darin, verschiedene Möglichkeiten und Szenarien zu Situationen, bei denen deutlich zu wenig Daten vorliegen, zu evaluieren. Methodisch handelt es sich dabei nicht um eine quantitative Netzwerkanalyse im eigentlichen Sinne.

Hier ergibt sich nun die erste Anfrage aus der Mathematik: Können aufgrund unvollständiger oder fehlender Datenquellen Ergebnisse wissenschaftlich nicht reproduziert und damit auch nicht bestätigt oder falsifiziert werden? Die zweite Anfrage ergibt sich in der Bedeutung der mathematischen Netzwerkanalysen in der Anwendungsdomäne, z. B. die Frage was bestimmte Zentralitätsmaße im gegebenen Forschungsfeld, etwa in der historischen Netzwerkanalyse, bedeuten. Umgekehrt ist aber auch zu fragen, welche in den Geistes- und Sozialwissenschaften populären Methoden in der Graphentheorie nicht oder kaum rezipiert und damit erforscht werden. Dies betrifft zum Beispiel das vielfältige Gebiet der Community-Detection, da eine – oder mehrere – mathematische Definition von »Community« nicht existieren⁹⁴. Obwohl es ein Bewusstsein für diese methodischen Fragen gibt⁹⁵, sind doch nur sehr wenige Veröffentlichungen in diesem Bereich zu finden, die sich primär mit der mathematischen Validierung von Zentralitätsmaßen in geisteswissenschaftlichen Fragestellungen beschäftigen⁹⁶. Die zusammenhängende wissenschaftliche

⁸² Vgl. Wilkinson et al. 2016.

⁸³ Vgl. beispielsweise Dörpinghaus / Stenschke 2018; Langmead et al. 2016; Aydogan et al. 2021.

⁸⁴ Cimiano et al. 2020, S. 229.

⁸⁵ Vgl. Kahn / Simon 2020.

⁸⁶ Vgl. z. B. Barbera 2013, S. 91; Dörpinghaus / Stenschke 2018.

⁸⁷ Vgl. Aydogan et al. 2021.

⁸⁸ Vgl. Hyvönen 2020a.

⁸⁹ Vgl. Hyvönen 2020b.

⁹⁰ Vgl. Silva et al. 2022.

⁹¹ Vgl. Nygren et al. 2014.

⁹² Vgl. den Sammelband Golub / Liu 2022.

⁹³ Vgl. Menin et al. 2022.

⁹⁴ Vgl. Wasserman / Faust 1994.

⁹⁵ Vgl. beispielsweise Rollinger 2020.

⁹⁶ Vgl. Dörpinghaus et al. 2022; de Valeriola 2021.

und systematische Evaluierung der digitalen Methoden in dieser Schnittmenge der Disziplinen steht damit noch aus⁹⁷. Doch gerade aus dieser interdisziplinären Perspektive heraus würden sich weitere Impulse für die Netzwerkansätze ergeben, wie im nächsten Abschnitt anhand ausgewählter Beispiele diskutiert wird.

5. Ausgewählte Beispiele

Abschließend soll noch die – größtenteils unabhängige – Entwicklung von Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften anhand ausgewählter Beispiele dargestellt werden. Hierbei soll detailliert aufgeschlüsselt werden, welche Vorteile sich aus dem Konzept von Linked Data und dem Netzwerkparadigma ergeben. Zunächst wollen wir uns dem Bereich der (historischen) Netzwerkanalyse zuwenden.

Knappett beschreibt beispielsweise Anwendungen von Netzwerkansätzen in der Archäologie⁹⁸. Handelsnetzwerke, Austauschnetzwerke und Straßennetzwerke tragen als ganz allgemeine Netzwerke zum Verständnis der Geschichte bei. Gerade auch in der Archäologie werden die in den vorherigen Abschnitten schon diskutierten Einschränkungen deutlich: »Network science is not a single, monolithic entity, but denotes a diverse set of methods, models, and approaches concerning the study of the management, representation, and analysis of network data which represent our hypotheses about how and why relationships matter«⁹⁹. Nicht die eigentliche Fragestellung oder Methode wird mithilfe der Netzwerke entworfen, sondern es wird einfach eine neue Form der Darstellung und der Analyse genutzt. Somit sind die sozialen Netzwerke gleichsam eine Art Werkzeugkasten.

Das offensichtlichste Problem ist dabei das Quellenproblem. Reitmayer und Marx fassen zusammen:

»Selbst die gegenwartsnah operierende Zeitgeschichte sieht sich oft außerstande, die für quantifizierende Untersuchungen erforderlichen Daten mit vertretbarem Aufwand und unter Beachtung der Archivsperrfristen bzw. der Zugänglichkeit von (privaten) Archiven überhaupt zusammenzutragen«¹⁰⁰.

Sie fordern deswegen, statt von einer historischen Netzwerkforschung von einer »Verwendung von Netzwerkansätzen« zu sprechen. Dies ist gerechtfertigt. Denn zusammenfassend findet sich beispielsweise bei Collar die bewusst vereinfachte Definition des »network thinking as a new methodology for understanding the processes of change and the spread of innovation in the past.«¹⁰¹ Auch Rollinger beschäftigt sich ausgiebig mit der Methodenkritik¹⁰² hinsichtlich der variablen Reichweite der Ergebnisse und »weist auf die prekäre Quellengrundlage als Ursache für die lediglich relative Aussagekraft der Netzwerkanalyse hin«¹⁰³. Dabei müssten die Quellen auch interpretiert werden, weil sie keine formalen Aussagen über die Qualität der Beziehung oder deren zeitliche Dauer zulassen. Es bleibt, dass die Netzwerkanalyse zusätzliche Aspekte zeigen kann, »aber allein klassische Quellenkritik vermag den qualitativen Gehalt der Beziehungen zu ergründen.«¹⁰⁴

An diesem Punkt bieten sich verschiedene neue Perspektiven. Zunächst ist die Frage an den Bereich der Informatik und Mathematik zu stellen, wie Ambiguität und Unsicherheit sowie eine zeitliche Komponente in einem Netzwerk dargestellt und analysiert werden können. Hier gibt es bereits Projekte im Bereich der DH die diese Ansätze verfolgen¹⁰⁵. Weiterhin ergeben sich durch den Aspekt von Linked Data weitere Möglichkeiten, das Netzwerk zu ergänzen und weitergehende Fragen zu beantworten (vgl. Abbildung 4). So können verschiedene externe Datenquellen zur Komplementierung der Daten genutzt werden, etwa Daten aus Literaturdatenbanken um Aussagen zu disambiguieren, während Geoinformationssysteme beispielsweise zur räumlichen Ergänzung beitragen. Neben der potenziellen Ergänzung fehlender Informationen kann aber auch eine Qualitätskontrolle durch mathematische Methoden – z. B. die Validierung von Zentralitätsmaßen¹⁰⁶ – bzw. Graphanalysen zur Generierung neuer Relationen und Entitäten – z. B. durch *Link Prediction* – angewendet werden.

⁹⁷ Vgl. dazu ausführlich Dörpinghaus 2021.

⁹⁸ Vgl. Knappett 2013.

⁹⁹ Collar 2013.

¹⁰⁰ Reitmayer / Marx 2010, S. 869.

¹⁰¹ Collar 2013.

¹⁰² Vgl. Rollinger 2014.

¹⁰³ Ganter 2015, S. 183.

¹⁰⁴ Ganter 2015, S. 183.

¹⁰⁵ Vgl. Wagner 2019.

¹⁰⁶ Vgl. Dörpinghaus et al. 2022; de Valeriola 2021.

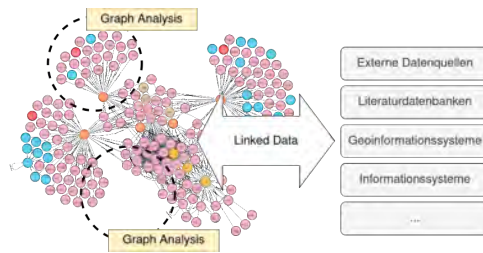


Abb. 4: Illustration eines Datenworkflows, der mittels Linked Data das Netzwerk erweitert und plausibilisiert. Graphanalysen vervollständigen die Werkzeuge, die zur Verfügung stehen, etwa mit Methoden zur Qualitätskontrolle. [Dörpinghaus, 2022]

Ein weiteres Beispiel ergibt sich im Kontext der Computational Social Sciences beim Monitoring des Arbeitsmarktes und insbesondere der Aus- und Weiterbildungen. Hier stehen klassisch sehr viele Daten zur Verfügung, etwa Aus- und Weiterbildungsordnungen, Stellenausschreibungen und Datenbanken zu Berufen und Wirtschaftsbranchen. Es ergibt sich methodisch eine ähnliche Situation wie in anderen Fachgebieten. So werden viele Informationen händisch abgefragt (z. B. durch Befragungen oder aus statistischen Auswertungen) und erst nach händischer Kuration zur Analyse freigegeben. Ähnlich müssen z. B. Historiker*innen Quellen untersuchen und daraus die wichtigen Datenpunkte extrahieren. Gleichzeitig erleichtert interoperables Wissen mittels Linked Data das Arbeiten mit umfangreicheren Datensätzen. So müssen Texte mit Methoden des *Text Minings* weiterverarbeitet, oder Daten von Webseiten, z. B. Weiterbildungsangebote oder Social Media Daten, mittels *Web Mining* aggregiert werden. So ergibt sich nicht nur implizit ein Wissensnetzwerk, sondern es kann auch mit ›klassischen‹ Netzwerkansätzen kombiniert werden: Um eine aktuelle Übersicht über Kompetenzen und Hilfsmittel oder Weiterbildungsangebote, über die Rezeption von Berufen, Arbeitsinhalte, etc. zu erlangen, können beispielsweise Twitter-Daten mit der SNA analysiert werden (vgl. Abbildung 5).

Hierbei sind nicht nur die oben genannten Methoden und Technologien relevant, sondern es zeigt sich insbesondere die Wichtigkeit von Linked Data. Denn klassische Ansätze würden die benötigten Daten z. B. aus Stellenausschreibungen extrahieren oder Umfragedaten auswerten. Diese Daten sind aber in ihrer normalen Form nicht interoperabel mit den Daten aus Social-Media-Analysen. Was sind Arbeitsinhalte, etwa Arbeitsmittel? Welche Kompetenzen werden genannt oder in Ausbildungsordnungen vorausgesetzt? Nicht nur das geschriebene Wort muss mit dem ›offiziellen‹ Sprachgebrauch verknüpft werden, sondern die verschiedenen Daten müssen auch vollständig interoperabel gestaltet werden um eine vollständig automatisierte Auswertung und einen Vergleich der verschiedenen Daten zu erreichen.



Abb. 5: Illustration eines Twitter-Netzwerks zum Hashtag #Fachinformatiker für das erste Quartal 2020. Rote Knoten entsprechen Tweets, blaue Hashtags und grüne Organisationen. [Dörpinghaus, 2022]

Dieses Beispiel zeigt nicht nur die Notwendigkeit interdisziplinären Arbeitens, sondern insbesondere auch die Notwendigkeit der Zusammenarbeit innerhalb einer Disziplin, wenn verschiedene methodische Ansätze verwendet werden. Aus diesen ergeben sich verschiedene Daten, die aber sinnvollerweise von Anfang an interoperabel gestaltet werden.

6. Ausblick: Herausforderungen und Perspektiven

Dieser Artikel hat zwei Herausforderungen und Perspektiven für die Verwendung von Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften erarbeitet:

Zum einen die Bedeutung interdisziplinären Arbeitens. Nicht nur das Konzept von Linked Data, sondern auch der vielfältige methodische und algorithmische Werkzeugkasten der Informatik und Mathematik kann für neue Perspektiven auf geistes- und sozialwissenschaftliche Probleme sorgen und zu ihrer Problemlösung beitragen.

Gleichzeitig ergibt sich aus einer eher technischen, d. h. einer von den Geistes- und Sozialwissenschaften eher distanzierenden, Sicht, dass das Netzwerkparadigma eigentlich viel weiter gefasst werden muss. Schon der Einsatz von Linked Data führt implizit zu Wissensnetzwerken und damit zur potenziellen weiteren Anwendung von Netzwerkanalysen.

Zum zweiten ergibt sich durch das Konzept von Linked Data auch eine neue intradisziplinäre Perspektive innerhalb der Geistes- und Sozialwissenschaften: Wenn beispielsweise aus einem sozialen Netzwerk ein Wissensgraph wird, so stehen neue Methoden zur Verfügung. Ebenso ergeben sich neue Perspektiven, wenn eine sozialwissenschaftliche Umfrage als Wissensgraph mit weiteren Daten verknüpft wird und damit Rückschlüsse auf das – bisher nicht systematisch untersuchte – soziale Netzwerk der Teilnehmenden möglich sind.

Noch allgemeiner: Diese kontextuellen Informationen sind ein entscheidender Faktor für datenbasierte Auswertungen, nicht nur in der interdisziplinären Forschung und in sozialen Netzwerken. Sie bilden einen verknüpften Datensatz, der mehrere Daten aus verschiedenen Quellen umfasst. Die wichtigste Schlussfolgerung an dieser Stelle ist, dass interdisziplinäre Ansätze sowohl bei der Modellierung großer Wissensnetzwerke mit zusätzlichen Informationen, d. h. Linked Data, als auch bei der Bewältigung der Herausforderungen bei deren Analyse helfen.

Bislang wird diese ganzheitliche Perspektive in der Forschung selten berücksichtigt. Fehlende verknüpfte Daten und fehlende Methoden für groß angelegte Wissensnetzwerke stellen daher eine ernsthafte Einschränkung dar. In diesem Beitrag wurde diskutiert, wie diese Lücke durch interdisziplinäre Forschung geschlossen werden kann. Wie an mehreren Stellen gezeigt werden konnten, kann eine Zusammenarbeit zwischen Graphentheorie, Data Science und Netzwerkansätzen in den Geistes- und Sozialwissenschaften das Feld weiten.

Zukünftig sollten die potenziellen Auswirkungen von Wissensgraphen genauer untersucht werden, um zum Beispiel ihre Auswirkungen auf Analysen und Algorithmen zu verstehen. Dabei sollte auch eine geistes- und sozialwissenschaftliche Perspektive einbezogen werden: Werfen diese Effekte ein neues Licht auf die Daten oder produzieren sie lediglich Artefakte? Eine enge Zusammenarbeit zwischen Graphentheorie und Geisteswissenschaften würde also dazu beitragen, das Verständnis von Netzwerkstrukturen und deren Wechselwirkung mit anderen Daten und dem Informationsfluss zu verbessern. Es scheint notwendig, dass die künftige Forschung neben der Analyse von Netzwerkstrukturen auch nach einem tieferen Verständnis verschiedener – sowohl quantitativer als auch qualitativer – Daten und deren Einfluss auf Relationen bzw. Beziehungen und Interaktionen innerhalb der Geisteswissenschaften sucht.

Insofern versteht sich dieser Artikel als ein Plädoyer für eine Zusammenarbeit über Fach- und Disziplinengrenzen hinaus und zeigt in diesem Spannungsfeld auch technische und inhaltliche Herausforderungen auf.

Bibliografische Angaben

- Aristoteles: *Historia animalium*: Buch 1 und 2. Hg. von Stephan Zierlein. Berlin 2013. (= Aristoteles Werke in deutscher Übersetzung, Bd. 16: Zoologische Schriften, 1) DOI: [10.1524/9783050051635](https://doi.org/10.1524/9783050051635) [Nachweis im GVK]
- Aristoteles: *Historia animalium*, e *Typographeo academico* 1837. [Nachweis im GVK]
- Aristotelische Biologie: Intentionen, Methoden, Ergebnisse. Hg. von Wolfgang Kullmann / Sabine Föllinger. (Aristoteles' Biologie, Bad Homburg, 24.–28.07.1995) Stuttgart 1997. (= Philosophie der Antike, 6) [Nachweis im GVK]
- Juriaan Baas / Mehdi M. Dastani / Ad J. Feelders: Entity Matching in Digital Humanities Knowledge Graphs. In: Proceedings of the Conference on Computational Humanities Research 2021. Hg. von Maud Ehrmann / Folgert Karsdorp / Melvin Wevers / Tara Lee Andrews / Manuel Burghardt / Mike Kestemont / Enrique Manjavacas / Michael Piotrowski / Joris van Zundert. (CHR: 2, Amsterdam, 17.–19.11.2021) Aachen 2021, S. 1–15, (= CEUR workshop proceedings, 2989) PDF. [online](https://doi.org/10.1145/3335409.3335411)
- Anne Baillot / Anna Busch: Vernetzung–Erzählung–Kollation. Digitale Methoden in der Biographieforschung. In: BIOS–Zeitschrift für Biographieforschung, Oral History und Lebensverlaufsanalysen 30 (2019), H. 1–2, S. 7–8. DOI: [10.3224/bios.v30i1-2.03](https://doi.org/10.3224/bios.v30i1-2.03) [Nachweis im GVK]
- Michele Barbera: Linked (Open) Data at Web Scale: Research, Social and Engineering Challenges in the Digital Humanities. In: Global Interoperability and Linked Data in Libraries. Hg. von Mauro Guerrini. In: JLIIS.it 4 (2013), H. 1, S. 91–104. DOI: [10.4403/jlis.it-6333](https://doi.org/10.4403/jlis.it-6333)
- Tim Berners-Lee: Linked Data. In: w3.org. Design Issues. Beitrag vom 27.07.2006. text/HTML. [online](https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData)
- Tim Berners-Lee / James Hendler / Ora Lassila: The Semantic Web. In: Scientific American 284 (2001), H. 5, S. 34–43. [Nachweis im GVK]
- David E. Biegel / Ellen Steele McCardle / Susan Mendelson: *Social Networks and Mental Health: An Annotated Bibliography*. Beverly Hills, CA 1985. [Nachweis im GVK]
- Angela Bonifati / Stefania Dumbrava: Graph Queries: From Theory to Practice. In: ACM SIGMOD Record 47 (2019), H. 4, S. 5–16. [10.1145/3335409.3335411](https://doi.org/10.1145/3335409.3335411) [Nachweis im GVK]
- Karine Chemla: Explorations in the History of Mathematical Recreations: An Introduction. In: *Historia Mathematica* 4 (2014), 41, S. 367–376. DOI: [10.1016/j.hm.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.hm.2014.07.002) [Nachweis im GVK]
- Chen Chen / Wei Wang / Xiaoyang Wang: Efficient Maximum Closeness Centrality Group Identification. In: Databases Theory and Applications. Australasian Database Conference. Hg. von Muhammad Aamir Cheema / Wenjie Zhang / Lijun Chang. (ADC:27, Sydney, 28.–29.09.2016). Cham 2016, S. 43–55. (= Lecture Notes in Computer Science, 9877) DOI: [10.1007/978-3-319-46922-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46922-5) [Nachweis im GVK]
- Philipp Cimiano / Christian Chiarcos / John P. McCrae / Jorge Gracia: Linguistic Linked Data in Digital Humanities. In: Linguistic Linked Data: Representation, Generation and Applications. Hg. von Philipp Cimiano / Christian Chiarcos / John P. McCrae / Jorge Gracia. Cham 2020, S. 229–262. DOI: [10.1007/978-3-030-30225-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30225-2_13) [Nachweis im GVK]
- Arianna Ciula / Øyvind Eide: Modelling in Digital Humanities: Signs in Context. In: *Digital Scholarship in the Humanities* 32 (2017), Suppl. 1, S. i33–i46. DOI: [10.1093/llc/fqw045](https://doi.org/10.1093/llc/fqw045)
- Anna Collar: *Religious Networks in the Roman Empire: The Spread of New Ideas*. New York u. a. 2013. [Nachweis im GVK]
- Martin Coward: Against Network Thinking: A Critique of Pathological Sovereignty. In: *European Journal of International Relations* 24 (2018), H. 2, S. 440–463. DOI: [10.1177/1354066117705704](https://doi.org/10.1177/1354066117705704) [Nachweis im GVK]
- Reinhard Diestel: *Graphentheorie*. 4. Auflage, erster korrigierter Nachdruck. Heidelberg 2012. [Nachweis im GVK]
- Jens Dörpinghaus: Digital Theology: New Perspectives on Interdisciplinary Research Between the Humanities and Theology. In: *Interdisciplinary Journal of Research on Religion* 18 (2022). [online](https://doi.org/10.1177/1354066117705704)
- Jens Dörpinghaus: Die soziale Netzwerkanalyse: Neue Perspektiven für die Auslegung biblischer Texte? In: *Bibisch erneuerte Theologie* 5 (2021), S. 75–96. [Nachweis im GVK]
- Jens Dörpinghaus: Soziale Netzwerke im frühen Christentum nach der Darstellung in Apg 1–12. Pretoria 2020. Handle: [handle.net/10500/26609](https://hdl.handle.net/10500/26609)
- Jens Dörpinghaus / Andreas Stefan: Semantic Graph Queries on Linked Data in Knowledge Graphs. In: *Recent Advances in Computational Optimization. Results of the Workshop on Computational Optimization WCO 2020*. Hg. von Stefa Fidanova. (WCO: 13, Sofia, 06.–09.09.2020. *Studies in Computational Intelligence*, vol 986. Cham 2022, S.81–102. DOI: [10.1007/978-3-030-82397-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82397-9_4) [Nachweis im GVK]
- Jens Dörpinghaus / Christoph Stenschke: Ein kollaborativer Workflow zur historischen Netzwerkanalyse mit Open Source Software. In: *Science Track FrOSCon*. Hg. von Sayeed Klewitz-Hommelsen / Martin Lang / Bernd Schönbach. Sankt Augustin 2018. DOI: [10.18418/978-3-96043-093-3](https://doi.org/10.18418/978-3-96043-093-3)
- Jens Dörpinghaus / Vera Weil / Carsten Düing / Martin W. Sommer: Centrality Measures in Multi-Layer Knowledge Graphs. In: *Communication Papers of the 17th Conference on Computer Science and Intelligence Systems*. Hg. von Maria Ganzha / Leszek Maciaszek / Marcin Paprzycki / Dominik Ślęzak. (Conference: 17, Sofia, 04.–07.09.2022) 2022, S. 163–170. (= *Annals of Computer Science and Information Systems*, 32) DOI: [10.15439/2022F43](https://doi.org/10.15439/2022F43)
- Johanna Drucker: Graphical Approaches to the Digital Humanities. In: *A New Companion to Digital Humanities*. Hg. von Susan Schreibman / Ray Siemens / John Unsworth. Chichester 2015, S. 238–250. [Nachweis im GVK]
- Dennis C. Duling: The Jesus Movement and Social Network Analysis (Part I: The Spatial Network). In: *Biblical Theology Bulletin* 29 (1999), 4, S. 156–175. DOI: [10.1177/014610799902900404](https://doi.org/10.1177/014610799902900404) [Nachweis im GVK]
- Dennis C. Duling: The Jesus Movement and Social Network Analysis (Part II. The Social Network). In: *Biblical Theology Bulletin: A Journal of Bible and Theology* 30 (2000), H. 1, S. 3–14. DOI: [10.1177/014610790003000102](https://doi.org/10.1177/014610790003000102) [Nachweis im GVK]
- Dennis C. Duling: Paul's Aegean Network: The Strength of Strong Ties. In: *Biblical Theology Bulletin* 43 (2013), H. 3, S. 135–154. DOI: [10.1177/0146107913493564](https://doi.org/10.1177/0146107913493564) [Nachweis im GVK]
- Velitchko Filipova / Victor Schetinger / Kathrin Raminger / Nathalie Soursos / Susana Zapke / Silvia Miksch: Gone Full Circle: A Radial Approach to Visualize Event-Based Networks in Digital Humanities. In: *Visual Informatics* 5 (2021), H. 1, S. 45–60. DOI: [10.1016/j.visinf.2021.01.001](https://doi.org/10.1016/j.visinf.2021.01.001)
- Linton C. Freeman: Centrality in Social Networks Conceptual Clarification. In: *Social Networks* 1 (1978), H. 3, S. 215–239. DOI: [10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7) [Nachweis im GVK]
- Angela Ganter: Rezension: *Amicitia sanctissima colenda. Freundschaft und soziale Netzwerke in der späten Republik*. (= *Studien zur Alten Geschichte*, 19.). In: *Historische Zeitschrift* 301 (2015), H. 1, S. 182–184. DOI: [10.1515/hzhz-2015-0304](https://doi.org/10.1515/hzhz-2015-0304) [Nachweis im GVK]
- The Gene Ontology Handbook. Hg. von Christophe Dessimoz / Nives Škunca. New York 2017. [Nachweis im GVK]
- Paulus Gerdes: On Mathematics in the History of Sub-Saharan Africa. In: *Historia mathematica* 21 (1994), H. 3, S. 345–376. DOI: [10.1006/hmat.1994.1029](https://doi.org/10.1006/hmat.1994.1029) [Nachweis im GVK]
- Sebastian Gießmann: Graphen können alles: Visuelle Modellierung und Netzwerktheorie vor 1900. In: *Visuelle Modelle*. Hg. von Steffen Siegel / Ingeborg Reichle / Achim Spelten. Paderborn u. a. 2008, S. 269–284. DOI: [10.30965/9783846746325_019](https://doi.org/10.30965/9783846746325_019) [Nachweis im GVK]
- Koraljka Golub / Ying-Hsang Liu: *Information and Knowledge Organisation in Digital Humanities: Global Perspectives*. London 2022. DOI: [10.4324/9781003131816](https://doi.org/10.4324/9781003131816) [Nachweis im GVK]
- Robert Gramsch: Zerstörte oder verblasste Muster? Anwendungsfelder mediävistischer Netzwerkforschung und das Quellenproblem. In: *Handbuch Historische Netzwerkforschung: Grundlagen und Anwendungen*. Hg. von Martin Düring / Ulrich Eumann / Martin Stark / Linda von Keyserlingk. Münster 2016. [Nachweis im GVK]
- Felipe Grandó / Diego Noble / Luis C. Lamb: An Analysis of Centrality Measures for Complex and Social Networks. In: 2016 IEEE Global Communications Conference. (GLOBECOM, Washington, DC, 04.–08.12.2016) 2016. DOI: [10.1109/GLOCOM.2016.7841580](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7841580)

- Mark S. Granovetter: The Strength of Weak Ties. In: *American Journal of Sociology* 78 (1973), H. 6, S. 1360–1380. DOI: [10.1086/225469](https://doi.org/10.1086/225469) [Nachweis im GVK]
- Jonathan L. Gross / Jay Yellen: *Handbook of Graph Theory*. Boca Raton 2003. DOI: [10.1201/9780203490204](https://doi.org/10.1201/9780203490204)
- Handbuch Netzwerkforschung. Hg. von Christian Stegbauer / Roger Häußling. Wiesbaden 2010. DOI: [10.1007/978-3-531-92575-2](https://doi.org/10.1007/978-3-531-92575-2) [Nachweis im GVK]
- Marina Hennig: *Individuen und ihre sozialen Beziehungen*. Wiesbaden 2006. [Nachweis im GVK]
- Pascal Hitzler / Markus Krötzsch / Bijan Parsia / Peter F. Patel-Schneider / Sebastian Rudolph: *OWL 2 Web Ontology Language Primer (Second Edition)*. In: w3.org. Recommendations. Beitrag vom 11.12.2012. [online]
- Eero Hyvönen (2020a): Linked Open Data Infrastructure for Digital Humanities in Finland. In: DHN 2020 Digital Humanities in the Nordic Countries. Proceedings of the Digital Humanities in the Nordic Countries 5th Conference 2020. Hg. von Sanita Reinsone / Inguna Skadiņa / Anda Baklāne / Jānis Daugavietis. (DHN: 5, Riga, 20.–23.20.2020) Aachen 2020, S. 254–259. (= CEUR workshop proceedings, 2612) URN: [urn:nbn:de:0074-2612-3](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0074-2612-3)
- Eero Hyvönen (2020b): »Sampo« Model and Semantic Portals for Digital Humanities on the Semantic Web. In: DHN 2020 Digital Humanities in the Nordic Countries. Proceedings of the Digital Humanities in the Nordic Countries 5th Conference. (2020).Hg. von Sanita Reinsone / Inguna Skadiņa / Anda Baklāne / Jānis Daugavietis. (DHN: 5, Riga, 20.–23.20.2020) Aachen 2020, S. 373–378. (= CEUR workshop proceedings, 2612) URN: [urn:nbn:de:0074-2612-3](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0074-2612-3)
- Eero Hyvönen / Petri Leskinen / Minna Tampere / Heikki Rantala / Esko Ikkala / Jouni Tuominen / Kirsi Keravuori: *BiographySampo – Publishing and Enriching Biographies on the Semantic Web for Digital Humanities Research*. In: *The Semantic Web*. Hg. von Pascal Hitzler / Miriam Ferrnede / Krzysztof Janowicz / Amrapali Zaveri / Alasdair J. G. Gray / Vanessa Lopez / Armin Haller / Karl Hammar. (ESWC: 16, Portorož, 02.–06.06.2019) Cham 2019, S. 574–580. DOI: [10.1007/978-3-030-21348-0_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21348-0_37) [Nachweis im GVK]
- Rebecca Kahn / Rainer Simon: *Feast and Famine: The Problem of Sources for Linked Data Creation*. In: *Graph Technologies in the Humanities*. Proceedings 2020. Hg. von Tara Andrews / Franziska Diehr / Thomas Efer / Andreas Kuczera / Joris van Zundert. (Konferenz, Wien, 21.–22.02.2020) Aachen 2020, S. 86–100. (= CEUR workshop proceedings, 3110) URN: [urn:nbn:de:0074-3110-2](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0074-3110-2)
- Susan Kaplan: *Ethnological and Biogeographical Significance of Pottery Sherds from Nissan Island, Papua New Guinea*. In: *Fieldiana. Anthropology* 66 (1976), H. 3, S. 35–89. [Nachweis im GVK]
- Richard Khulusi / Stephanie Billib / Stefan Jänicke: *Exploring Life in Concentration Camps through a Visual Analysis of Prisoners' Diaries*. In: *Information* 13 (2022), H. 2, S. 54. DOI: [10.3390/info13020054](https://doi.org/10.3390/info13020054)
- Carl Knappett: *Network Analysis in Archaeology: New Approaches to Regional Interaction*. 2013. [Nachweis im GVK]
- Lisbet Koerner: *Linnaeus. Nature and Nation*. Ebook. Cambridge, MA 2022 (2001). DOI: [10.4159/9780674039698](https://doi.org/10.4159/9780674039698) [Nachweis im GVK]
- Mikko Koho / Petri Leskinen / Eero Hyvönen: *Integrating Historical Person Registers as Linked Open Data in the WarSampo Knowledge Graph*. In: *Semantic Systems. In the Era of Knowledge Graphs*. Hg. von Eva Blomqvist / Paul Groth / Victor de Boer / Tassilo Pellegrini / Mehwish Alam / Tobias Käfer / Peter Kieseberg / Sabrina Kirrane / Albert Meroo-Pueela / Harshvardhan J. Pandit. (SEMANTICS: 16, Amsterdam, 07.–10.09.2020) Cham 2020, S. 118–126. (= Lecture Notes in Computer Science, 12378) DOI: [10.1007/978-3-030-59833-4_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59833-4_8) [Nachweis im GVK]
- Klaus Kremer / Ursula Wolf: *Ontologie. Historisches Wörterbuch der Philosophie online*. Hg. von Joachim Ritter / Karlfried Gründer / Gottfried Gabriel. Basel 2017. DOI: [10.24894/HWPh.5585](https://doi.org/10.24894/HWPh.5585)
- Matthis Krischel / Frank Kressing / Heiner Fangerau: *Computergestützte Netzwerkanalyse in Biologie, Sprach und Geschichtswissenschaft*. In: *Informatik 2009. Im Focus das Leben*. Hg. von Stefan Fischer. Bonn 2009, S. 64–64. [Nachweis im GVK]
- Jakob Kusnick / Richard Khulusi / Josef Focht / Stefan Jänicke: *A Timeline Metaphor for Analyzing the Relationships between Musical Instruments and Musical Pieces*. In: *VISIGRAPP 2020. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP: 15, Valetta, 27.–29.02.2020) Sétabal 2020, Bd. 3, S. 240–251*. DOI: [10.5220/0008990502400251](https://doi.org/10.5220/0008990502400251) [Nachweis im GVK]
- Alison Langmead / Jessica M. Otis / Christopher N. Warren / Scott B. Weingart / Lisa D. Zilinski: *Towards Interoperable Network Ontologies for the Digital Humanities*. In: *International Journal of Humanities and Arts Computing* 10 (2016), H. 1, S. 22–35. DOI: [10.3366/ijhac.2016.0157](https://doi.org/10.3366/ijhac.2016.0157) [Nachweis im GVK]
- Ora Lassila / Ralph R Swick: *Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification*. In: w3.org Recommendations. Beitrag vom 22.02.1999. HTML/text. [online]
- Rongqian Ma / Kai Li: *Digital Humanities as a Cross-Disciplinary Battleground: An Examination of Inscriptions in Journal Publications*. In: *Journal of the Association for Information Science and Technology* 73 (2022), H. 2, S. 172–187. DOI: [10.1002/asi.24534](https://doi.org/10.1002/asi.24534) [Nachweis im GVK]
- Steven E. Massey: *Social Network Analysis of the Biblical Moses*. In: *Applied Network Science* 1 (2016), Artikel 13. DOI [10.1007/s41109-016-0012-1](https://doi.org/10.1007/s41109-016-0012-1)
- Jean Mayer: *Développements récents de la théorie des graphies*. In: *Historia Mathematica* 3 (1976), H. 1, S. 55–62. DOI: [10.1016/0315-0860\(76\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0315-0860(76)90007-0) [Nachweis im GVK]
- Jennifer M. McClure: *Introducing Jesus's Social Network: Support, Conflict, and Compassion*. In: *Interdisciplinary Journal of Research on Religion* 12 (2016), Artikel 12. [online]
- Christofer Meinecke / David Joseph Wrisley / Stefan Jänicke: *Automated Alignment of Medieval Text Versions Based on Word Embeddings*. (2020). DOI: [10.31219/osf.io/tah3y](https://doi.org/10.31219/osf.io/tah3y)
- Aline Menin Minh Nhat Do / Carla Dal Sasso Freitas / Olivier Corby / Catherine Faron / Alain Giboin / Marco Winckler: *Using Chained Views and Follow-up Queries to Assist the Visual Exploration of the Web of Big Linked Data*. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* (2022). DOI: [10.1080/10447318.2022.2112529](https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2112529) [Nachweis im GVK]
- Henry Martyn Mulder: *Die Entstehung der Graphentheorie*. In: Klaus Wagner / Rainer Bodendiek, *Graphentheorie*. 3 Bde., Mannheim 1989–1993. Bd. 3 (1992): Zahlen, Gruppen, Einbettungen von Graphen und Geschichte der Graphentheorie, S. 296–313. [Nachweis im GVK]
- Ronald J. Murray / Barbara B. Tillett: *Cataloging Theory in Search of Graph Theory and Other Ivory Towers*. In: *Information Technology and Libraries* 30 (2011), H. 4, S. 170–184. DOI: [10.6017/ital.v30i4.1868](https://doi.org/10.6017/ital.v30i4.1868) [Nachweis im GVK]
- Thomas Nygren / Anna Foka / Philip Buckland: *The Status Quo of Digital Humanities in Sweden: Past, Present and Future of Digital History*. In: *H-Soz-Kult*. Beitrag vom 23.10.2014. [online]
- Matthew A. Peeples: *Finding a Place for Networks in Archaeology*. In: *Journal of Archaeological Research* 27 (2019), H. 4, S. 451–499. DOI: [10.1007/s10814-019-09127-8](https://doi.org/10.1007/s10814-019-09127-8) [Nachweis im GVK]
- Stephen R. Proulx / Daniel E. L. Promislow / Patrick C. Phillips: *Network thinking in ecology and evolution*. In: *Trends in Ecology & Evolution* 20 (2005), H. 6, S. 345–353. DOI: [10.1016/j.tree.2005.04.004](https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.004) [Nachweis im GVK]
- RDF Schema 1.1. In: w3.org. Recommendations. Beitrag vom 25. Februar 2014. Text/HTML. [online]
- Martin Reckziegel / David Joseph Wrisley / Taylor Wright Hixson / Stefan Jänicke: *Visual exploration of historical maps*. In: *Digital Scholarship in the Humanities* 36 (2021), Supplement 2, S. ii251–ii272. DOI: [10.1093/llc/fqaa059](https://doi.org/10.1093/llc/fqaa059)
- Morten Reitmayer / Christian Marx: *Netzwerkansätze in der Geschichtswissenschaft*. In: *Handbuch Netzwerkforschung*. Hg. von Christian Stegbauer / Roger Häußling. Wiesbaden 2010, S. 869–880. DOI: [10.1007/978-3-531-92575-2_76](https://doi.org/10.1007/978-3-531-92575-2_76) [Nachweis im GVK]
- Rikard Roitto: *The Johannine Information War: A Social Network Analysis of the Information Flow between Johannine Assemblies as Witnessed by 1-3 John*. In: *Drawing and transcending boundaries in the New Testament and early Christianity*. Hg. von Jacobus Kok / Martin Webber / Jermo van Nes. Wien u. a. 2019, S. 69–84. (= Beiträge zum Verstehen der Bibel, 38) [Nachweis im GVK]
- Christian Rollinger: *Amicitia sanctissime colenda*. In: *Freundschaft und soziale Netzwerke in der Späten Republik*. Heidelberg 2014. (= Studien zur alten Geschichte, 19) [Nachweis im GVK]
- Christian Rollinger: *Prolegomena. Problems and Perspectives of Historical Network Research and Ancient History*. In: *Journal of Historical Network Research* 4 (2020), S. 1–35. DOI: [10.25517/jhnr.v4i0.72](https://doi.org/10.25517/jhnr.v4i0.72)

- Gunter Saake / Kai-Uwe Sattler / Andreas Heuer: Datenbanken - Konzepte und Sprachen. 4. Auflage. Heidelberg u. a. 2018. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Alexander Schrijver: On the history of the shortest path problem. In: Optimization stories. 21st International Symposium on Mathematical Programming. Hg. von Martin Grötschel. (ISMP: 21, Berlin, 19.–24.08.2012) Bielefeld 2012, S. 155–167. (= Documenta Mathematica, 2012, Extra Vol) PDF. [\[online\]](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Klaus Schubert: Netzwerke und Netzwerkansätze: Leistungen und Grenzen eines sozialwissenschaftlichen Konzeptes. In: Netzwerkansätze im Business-to-Business-Marketing: Beschaffung, Absatz und Implementierung Neuer Technologien. Hg. von Michael Kleinaltenkamp / Klaus Schubert. Wiesbaden 1994, S. 8–49. DOI: [10.1007/978-3-322-82550-6_2](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Michael Schnegg: Die Wurzeln der Netzwerkforschung. In: Handbuch Netzwerkforschung. Hg. von Christian Stegbauer / Roger Häußling. Wiesbaden 2010, S. 21–28. DOI: [10.1007/978-3-531-92575-2_3](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Thomas Schweizer: Muster sozialer Ordnung: Netzwerkanalyse als Fundament der Sozialethnologie. Berlin 1996. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Gustav Senn: Die Entwicklung der biologischen Forschungsmethode in der Antike und ihre grundsätzliche Förderung durch Theophrast von Eresos. Aarau u. a. 1933. (= Veröffentlichungen der Schweizerischen Gesellschaft für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften, 8) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Gonçalo Melo da Silva / Ana Celeste Glória / Ângela Sofia Salgueiro Almeida / Daniel Monteiro / Marco Roque de Freitas / Nuno Freire: ROSSIO Infrastructure: A Digital Humanities Platform to Explore the Portuguese Cultural Heritage. In: Information 13 (2022), H. 2, S. 50. DOI: [10.3390/info13020050](#)
- SPARQL Query Language for RDF. In: w3.org. Recommendations. Beitrag vom 15. Januar 2008. Text/HTML. [\[online\]](#)
- William Thomas Stearn: The Background of Linnaeus's Contributions to the Nomenclature and Methods of Systematic Biology. In: Systematic Zoology 8 (1959), H. 1, S. 4–22. DOI: [10.2307/sysbio/8.1.4](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Manfred Thaller: Can Historical Information Be Represented Outside of a Graph / Hypergraph / Network? In: Graph Technologies in the Humanities 2021. Hg. von Tara Andrews / Franziska Diehr / Thomas Efer / Andreas Kuczera / Joris van Zundert. (Virtual Symposium, 09.02.2021) 2021. PDF: [\[online\]](#)
- Michael B. Thompson: The Holy Internet: Communication Between Churches in the First Christian Generation. In: Gospels for All Christians. Hg. von Richard Bauckham. London 1998, S. 49–70. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Selda Ulutas Aydogan / Sander Münster / Dino Girardi / Monica Palmirani / Fabio Vitali: A Framework to Support Digital Humanities and Cultural Heritage Studies Research. In: Research and Education in Urban History in the Age of Digital Libraries. Hg. von Florian Niebling / Sander Münster / Heike Messemer. (UHDL: 2, Dresden, 10.–11.10.2019) Cham 2021, S. 237–267. (= Communications in computer and information science, 1501). [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Sébastien de Valeriola: Can Historians Trust Centrality? Historical Network Analysis and Centrality Metrics Robustness. In: Journal of Historical Network Research 6 (2021), H. 1. DOI: [10.25517/jhnr.v6i1.105](#)
- Julia Verne: Ethnographie und ihre Folgen für die Kulturgeographie: eine Kritik des Netzwerkkonzepts in Studien zu translokaler Mobilität. In: Geographica Helvetica 67 (2013), H. 4, S. 185–194. DOI: [10.5194/gh-67-185-2012](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Daniel von Wachter: Dinge und Eigenschaften. Versuch zur Ontologie. Dettelbach 2000. (= Neue ontologische Forschung, 1) In: Open Access LMU. DOI: [10.5282/ubm/epub.1968](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Andreas Wagner: Ambiguität und Unsicherheit: Drei Ebenen eines Datenmodells. In: Die Modellierung des Zweifels – Schlüsselideen und -konzepte zur graphbasierten Modellierung von Unsicherheiten. Hg. von Andreas Kuczera / Thorsten Wübbena / Thomas Kollatz. Wolfenbüttel 2019. (= Zeitschrift für digitale Geisteswissenschaften / Sonderbände, 4) DOI: [10.17175/sb004_007](#)
- Hansjoachim Walther: Anwendungen der Graphentheorie. Braunschweig 2013. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Stanley Wasserman / Katherine Faust: Social Network Analysis: Methods and Applications. Cambridge u. a. 1994. (= Structural analysis in the social sciences, 8) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Jörg Wettlaufer: Der nächste Schritt? Semantic Web und digitale Editionen. In: Digitale Metamorphose: Digital Humanities und Editionswissenschaft. Hg. von Roland S. Kamzelak / Timo Steyer. Wolfenbüttel 2018 (= Zeitschrift für digitale Geisteswissenschaften / Sonderbände, 2) DOI: [10.17175/sb002_007](#)
- Jörg Wettlaufer: Neue Erkenntnisse durch digitalisierte Geschichtswissenschaft(en)? Zur hermeneutischen Reichweite aktueller digitaler Methoden in informationszentrierten Fächern. In: Zeitschrift für digitale Geisteswissenschaften 1 (2016), Artikel 8. DOI: [10.17175/2016_011](#)
- Mark D. Wilkinson et al.: The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship. In: Scientific Data 3 (2016), Artikel 160018. DOI: [10.1038/sdata.2016.18](#)
- Robin James Wilson: Graph Theory. In: History of Topology. Hg. von Ioan MacKenzie James. Amsterdam u. a. 1999, S. 503–529. [\[online\]](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Robin James Wilson / John John Watkins: Combinatorics: Ancient & Modern. Oxford 2013. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Georg Wöhrle: Theophrasts Methode in seinen botanischen Schriften. Amsterdam 1985. (= Studien zur antiken Philosophie, 13) [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Hans Wußing: 6000 Jahre Mathematik: Eine kulturgeschichtliche Zeitreise. Bde. Berlin 2008–. Bd. 2(2009): Von Euler bis zur Gegenwart. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Claudia Zaslavsky: Africa Counts: Number and Pattern in African Cultures. 3. Auflage. Chicago, IL 1999. [\[Nachweis im GVK\]](#)
- Marcia Zeng / Margie Hlava / Jian Qin / Gail Hodge / Denise Bedford: Knowledge Organization Systems (KOS) Standards. In: Proceedings of the Association for Information Science and Technology 44 (2007), H. 1, S. 1–3. DOI: [10.1002/meet.145044019](#) [\[Nachweis im GVK\]](#)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verschiedene Darstellungen desselben Graphen. Jede Darstellung vermittelt visuell andere Informationen, die darunterliegenden mathematischen Strukturen bleiben allerdings identisch. [Dörpinghaus 2022]

Abb. 2: Ein Überblick über die Kategorien von Graph Queries bzw. Graphenabfragen. Diese Kategorien geben einen ersten Überblick, auch über deren (Zeit-)Komplexität: RPQ ist PSPACE-vollständig, CRPQ und ECRPQ (in der Abbildung unter CQ zu finden) sind EXSPACE-vollständig, vgl. Bonifati / Dumbrova 2019. Zentralitätsmaße für Wissensgraphen sind ebenfalls recht komplex. Für einige Probleme gibt es effiziente Algorithmen, vgl. Grando et al. 2016, aber einige spezifischere Probleme sind bekanntermaßen NP-vollständig, z. B. Group Closeness Maximization (GCM) oder Maximum Betweenness Centrality, vgl. Chen et al. 2016.) [Dörpinghaus 2022]

Abb. 3: Darstellung eines biomedizinischen Wissensgraphen mit verschiedenen Layern (dargestellt durch verschiedene Farben), Relationen (Benennung auf den Kanten) und Labeln (Beschriftungen auf den Knoten). Es finden sich sowohl Kanten zwischen Knoten desselben Layers, als auch Kanten zwischen Knoten verschiedener Layer. [Dörpinghaus 2022]

Abb. 4: Illustration eines Datenworkflows, der mittels Linked Data das Netzwerk erweitert und plausibilisiert. Graphanalysen vervollständigen die Werkzeuge, die zur Verfügung stehen, etwa mit Methoden zur Qualitätskontrolle. [Dörpinghaus 2022]

Abb. 5: Illustration eines Twitter-Netzwerks zum Hashtag #Fachinformatiker für das erste Quartal 2020. Rote Knoten entsprechen Tweets, blaue Hashtags und grüne Organisationen. [Dörpinghaus 2022]