Zentralitäts- und Prestigemaße

Mutschke, Peter

5.3 Zentralitäts- und Prestigemaße

Peter Mutschke

1 Einführung

1.1 „Zentralität" und „Prestige" in sozialen Netzwerken

Zentralitätsmaße sind Indizes für die „Wichtigkeit" (Wasserman und Faust 1994) oder „Prominenz" (Knoke und Burt 1983) eines Knotens in einem Graphen bzw. Akteurs in einem sozialen Netzwerk[1]. Allerdings hat sich in der Netzwerkforschung bislang keine allgemein akzeptierte Definition von Zentralität durchgesetzt (Borgatti und Everett 2006), sodass ungefähr so viele Zentralitätsmaße existieren wie es Vorstellungen von der „Wichtigkeit" eines Akteurs in einem Netzwerk gibt. Eine zusätzliche Heterogenität resultiert aus dem Umstand, dass die Maße auf zwei grundverschiedenen Richtungen basieren: der Graphentheorie und der Matrixalgebra (Freeman 2008). Dennoch haben alle in der Netzwerkforschung gebräuchlichen Zentralitätsmaße einige grundlegende, allgemein akzeptierte Gemeinsamkeiten (vgl. Borgatti und Everett 2006; Freeman 1978/79; Koschützki et al. 2005; Wasserman und Faust 1994):

1. Zentralität ist ein *knotenbezogenes* Maß: Zentralitätsmaße liefern keine Aussagen über den betrachteten Graphen selbst, sondern einen positionalen Index für jeden seiner Knoten[2]. Die Grundintention dabei ist die Lokalisierung „zentraler" Akteure.
2. Zentralität ist ein *strukturelles* Attribut: Zentralitätsmaße machen Aussagen über die Involviertheit eines Knotens in die *Beziehungsstruktur* eines Netzwerkes. Ein Zentralitätsindex ist somit ausschließlich von der Struktur des betrachteten Graphen abhängig.
3. Zentralitätsmaße definieren eine *lineare Ordnung* auf der Menge der Knoten V eines Graphen durch Zuweisung numerischer Werte zu den betrachteten Knoten $v \in V$, sodass für ein gegebenes Zentralitätsmaß C und alle Knoten $i,j \in V$ gilt: $C(i) \leq C(j)$ oder $C(j) \leq C(i)$. Zentralitätsmaße liefern somit eine geordnete Menge $(V,\leq)$, die vergleichende Aussagen über die relative strukturelle Position der Akteure in einem Netzwerk und damit auch eine Identifizierung „zentraler" Akteure erlaubt.

Die Idee der strukturellen Zentralität (Bavelas 1948; Freeman 1977, 1978/79) beschreibt Zentralität somit als Eigenschaft der strategischen Position von Knoten in der Beziehungsstruktur eines Netzwerkes. Zentralitäts*maße* repräsentieren unterschiedliche Interpretationen von Zentralität und sind daher unterschiedliche Methoden, dieses strukturelle Knotenattribut zu operationalisieren. Allgemein akzeptiert ist dabei die Auffassung, dass Zentrali-

[1] Die Begriffe Knoten/Akteur, Kante/Beziehung und Graph/Netzwerk werden im Folgenden synonym verwendet.

[2] Die meisten Zentralitätsmaße für Kanten wurden als Varianten der Zentralitätsindizes für Knoten entwickelt (Koschützki et al. 2005).

tätsmaße die Einflussmöglichkeiten von Akteuren auf Interaktionsprozesse im Netzwerk, den sog. *network flow*, reflektieren und sich dabei lediglich in ihren Grundannahmen über die Struktur der Netzwerkprozesse unterscheiden (vgl. Borgatti und Everett 2006; Friedkin 1991; Jansen 2003). Zentrale Akteure sind demnach Akteure, die innerhalb der betrachteten Struktur im Sinne des jeweils verwendeten Zentralitätskonzepts wohlpositioniert sind und daher über ein hohes Einflusspotential im Netzwerk verfügen. „Prestige" wird dabei als eine spezielle Form von Zentralität für gerichtete Graphen betrachtet.

Dieser Beitrag führt in die wichtigsten Zentralitätskonzepte ein – ohne Anspruch auf Vollständigkeit, aber in dem Bemühen, einen Katalog grundlegender, in der Netzwerkforschung gebräuchlicher Zentralitäts- und Prestigemaße (Kapitel 2 und 3) zu liefern. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Darstellung der Konzepte gelegt[3]. Kapitel 4 diskutiert die Maße im Hinblick auf ihre Interpretier- und Anwendbarkeit sowie einige Desiderate der Zentralitätsforschung. Im Folgenden wird von einem ungerichteten, ungewichteten und zusammenhängenden Graphen $G = (V,E)$ mit der mindestens zweielementigen Knotenmenge V und der Kantenmenge E ausgegangen; ferner sei $n = |V|$ und $\boldsymbol{A}=[a_{ij}]$, $i,j \in V$, die symmetrische nxn-Adjazenzmatrix von G, wobei $a_{ij}=a_{ji}=1$ falls $(i,j) \in E$ und $a_{ij}=a_{ji}=0$ falls $(i,j) \notin E$; in den Formeln wird von jeweils distinkten Knoten ausgegangen (vgl. auch Kapitel 5.2 dieses Handbuches).

1.2 Klassifikation von Zentralitätsmaßen

Für einen Überblicksartikel empfiehlt es sich, die dargestellten Maße nach einem geeigneten Kriterium zu sortieren. Borgatti und Everett (2006) haben eine graphentheoretisch motivierte Klassifikation vorgeschlagen, die sich an der Position der Knoten auf den betrachteten Wegen (*walk position*) orientiert. Sie unterscheiden Maße, die Wege evaluieren, die von dem betrachteten Knoten ausgehen (oder an ihm enden), von Maßen, die Wege betrachten, welche über den jeweiligen Knoten laufen. Erstere nennen sie *radiale*, letztere *mediale* Zentralitätsmaße. Radiale Maße evaluieren demnach alle Dyaden mit dem betrachteten Knoten, mediale Maße dagegen alle Triaden, bei denen der betrachtete Knoten zwischen zwei anderen Knoten positioniert ist.

Zentralitätsmaße evaluieren allerdings nicht nur, *wo* Knoten auf den betrachteten Wegen positioniert sind (walk position). Sie unterscheiden sich – neben ihrer Schrittweite (*walk distance*) – vor allem auch darin, *welche* Wege betrachtet werden (*walk type*, Borgatti und Everett 2006). Hier lässt sich zwischen Maßen unterscheiden, welche die Betrachtung ausschließlich auf kürzeste Pfade beschränken, und solchen, die diese Einschränkung nicht machen. Maße des ersten Typs könnte man als *proximity*-orientierte Indizes bezeichnen, da sie auf möglichst direkte Verbindungen zwischen den betrachteten Knoten Bezug nehmen. Typische Anwendungsfälle für proximity-orientierte Maße sind Optimierungsprobleme in Verkehrsnetzwerken. Maße des zweiten Typs dagegen sind *connectivity*-orientierte Indizes, da sie auch multiple und längere Verbindungen zwischen den betrachteten Knoten berücksichtigen. Typische Anwendungsfälle für connectivity-orientierte Maße sind die Diffusion von Gerüchten oder Krankheiten in Kontaktnetzwerken.

[3] Einzelheiten und Beispiele zu den Verfahren können der jeweils zitierten Literatur sowie den Übersichtswerken von Wasserman und Faust (1994), Jansen (2003) und Trappmann et al. (2005) entnommen werden.

2 Zentralitätsmaße

2.1 Radiale Maße

2.1.1 Degree Centrality (Shaw 1954, Nieminen 1974, Freeman 1978/79)

Degree-Zentralität $C_D(i)$ misst die Zahl der direkten Nachbarn eines Knotens i anhand der Zahl der Kanten a_{ij}, die i mit anderen Knoten j verbinden: $C_D(i) = \sum_j a_{ij}$. Die auf den Maximalwert normierte Version ist $C'_D(i) = C_D(i)/(n\text{-}1)$. Zentral nach Degree sind demnach Akteure, die eine große Nachbarschaft von direkten Kontakten haben. Eine Position mit hohem Degree ermöglicht nicht nur eine direkte, sondern potentiell auch simultane Interaktion mit vielen anderen Netzwerkmitgliedern. Degree-Zentralität kann daher auch als Gradmesser für das Potential eines Akteurs für Netzwerkaktivitäten mit *unterschiedlichen* Ko-Akteuren betrachtet werden (Freeman 1978/79, Freeman et al. 1979/80). Degree ist allerdings ein rein lokales Maß, da es jeweils nur das unmittelbare Umfeld eines Akteurs betrachtet. Bei gerichteten Netzwerken wird zwischen dem relativen Innen- und dem relativen Außengrad eines Akteurs unterschieden. Der relative Außengrad (*Out-Degree*) entpricht der Anzahl der von einem Akteur ausgehenden Beziehungen. Der relative Innengrad (*In-Degree*) dagegen ist die Anzahl eingehender Beziehungen (s. auch Kapitel 3). Eine Erweiterung der Degree-Zentralität ist die Anzahl der Knoten, die der betrachtete Knoten in k Schritten erreichen kann (*Reach Centrality*) sowie die Anzahl der von einem Knoten ausgehenden Pfade der maximalen Länge k (*k-Path Centrality*, vgl. Sade 1989; Borgatti und Everett 2006).

2.1.2 Closeness Centrality (Bavelas 1950, Beauchamp 1965, Sabidussi 1966)

Closeness misst die Nähe eines Knotens zu allen anderen im Graphen auf der Basis graphentheoretischer Distanzen. Die Distanz $d(i,j)$ zwischen zwei Knoten i und j ist dabei definiert als die Zahl der Kanten des kürzesten i und j verbindenden Pfades. Die Closeness-Zentralität $C_C(i)$ eines Knotens i ist der Kehrwert der Summe der Distanzen von i zu allen anderen Knoten j: $C_C(i) = 1/\sum_j d(i,j)$. Das auf den Maximalwert normierte Maß ist $C'_C(i) = (n\text{-}1)/C_C(i)$. Nach Closeness ist ein Akteur zentral, wenn er durch kurze Pfaddistanzen von anderen Knoten im Netzwerk getrennt wird. Ein Knoten mit hoher Closeness ist daher weniger auf die Vermittlung durch andere Knoten angewiesen. Closeness gilt daher auch als Maß für die Effizienz eines Knotens im Sinne von Unabhängigkeit (Freeman 1978/79). Ein Problem des Closeness-Maßes ist allerdings, dass die Pfaddistanz zwischen unverbundenen Knoten unendlich ist. In diesen Fällen wird üblicherweise von einem maximalen Distanzwert von $(n\text{-}1)$ ausgegangen (vgl. Jansen 2003; Koschützki et al. 2005).

In der Literatur werden eine Reihe verwandter Konzepte diskutiert: *Radiality* (Valente und Foreman 1998) setzt Distanz in Beziehung zum Diameter des Graphen (Länge des längsten aller kürzesten Pfade). *Eccentricity* (Hage und Harary 1995) evaluiert die Länge des längsten aller kürzesten vom betrachteten Knoten ausgehenden Pfade zu allen anderen Knoten. *Distance-Based **F**-Measure* (Borgatti 2006) misst die relative Abnahme der Netzwerkkohäsion nach Entfernung des betrachteten Knotens (vgl. auch Latora und Marchiori 2007). *Markov Centrality* (White und Smyth 2003) begreift Zentralität als die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Knoten andere in möglichst wenig Schritten (mean first-passage time) während eines *random walks* erreicht.

2.1.3 Information Centrality (Stephenson und Zelen 1989)

Die Grundannahme der Information Centrality ist, dass sich Interaktionsprozesse in Netzwerken nicht allein über kürzeste Pfade entfalten, sondern alle Pfade für das Verständnis dynamischer Netzwerkprozesse wichtig sind. Information Centrality ist wie Closeness ein distanz-basiertes Maß, evaluiert aber nicht nur kürzeste, sondern alle kantendisjunkten Pfade, die vom betrachteten Knoten i ausgehen. Ein Pfad von i nach j wird dabei nach seinem „Informationsgehalt" gewichtet (*path information*), der definiert ist als der Kehrwert seiner Länge. Der „informationelle" Wert I_{ij} aller Pfade von i nach j (*combined path*) ergibt sich aus der Summe der Gewichte der einzelnen Pfade, wobei sich bei Redundanz von Kanten im combined path der Wert allerdings verringert. Die Kernaussage der Information Centrality ist nun, dass ein combined path eine größere Menge an Information „tragen" kann als ein kürzester Pfad. Information Centrality $C_I(i)$ schließlich ist definiert als der harmonische Durchschnitt der Informationswerte aller vom betrachteten Knoten i ausgehenden kombinierten Pfade zu anderen Knoten j im Netzwerk: $C_I(i)=n/\sum_j(1/I_{ij})$. Das relative Maß, bezogen auf den gesamten „Informationsfluss" im Netzwerk, ist $C'_I(i)= C_I(i)/\sum_j C_I(j)$ (Wasserman und Faust 1994). Der Fokus liegt hier also auf dem Potential eines Akteurs, Einfluss über unterschiedlich konfigurierte Kanäle im Netzwerk ausüben zu können (vgl. Friedkin 1991).[4] Da der Informationsgehalt eines Pfades mit seiner Länge abnimmt, favorisiert dieses Maß allerdings, wie Closeness, Akteure, die kurze Verbindungen zu anderen im Netzwerk haben.

2.1.4 Eigenvector Centrality (Katz 1953, Hubbell 1965, Bonacich 1972, 1987, 2001, 2004)

Eigenvector Centrality geht von einer systeminhärenten Zirkularität von Zentralität aus, nach der die Zentralität eines Knotens nicht isoliert von der Zentralität benachbarter Knoten betrachtet werden kann, sondern sich vielmehr durch Verbundenheit mit anderen zentralen Knoten steigert (was wiederum deren Zentralität erhöht usw.). Eigenvector Centrality $C_\lambda(i)$ ist daher wie folgt rekursiv definiert (Bonacich 1972): $C_\lambda(i)=\lambda\sum_j a_{ij}C_\lambda(j)$. Die Zentralität eines Knotens ergibt sich somit aus der Summe der Zentralität seiner jeweiligen Nachbarn. Die Konstante λ entspricht dabei dem Eigenvektor zum größten Eigenwert der Adjazenzmatrix. Nach diesem Zentralitätskonzept ist ein Akteur zentral, wenn er viele (direkte oder indirekte) Beziehungen zu Akteuren hat, die selbst wiederum zentral sind. Das Maß war zunächst nur für symmetrische Netzwerke definiert. Bonacich und Lloyd (2001) führen eine Verallgemeinerung für nicht-symmetrische Netzwerke ein (*Alpha Centrality*). Tam (1989) unterscheidet die reine, von anderen Knoten abgeleitete Zentralität von der vom betrachteten Knoten reflektierten Zentralität.

Eigenvektor-Zentralität basiert auf der Idee des positiven Feedbacks. Bonacich (1987) schlägt eine Variante vor, welche auch negatives Feedback berücksichtigt. Diese Spielart geht von negativ-verbundenen Netzwerken aus, wo sich das Einflusspotential eines Akteurs

[4] Die von Brandes und Fleischer (2005) vorgeschlagene *Current Flow Closeness Centrality* entspricht Information Centrality.

in dem Maße erhöht, in dem er mit Akteuren verbunden ist, die keine oder wenige Optionen haben. Bonacich's *Beta Centrality*, auch *Power Centrality* genannt, erweitert Eigenvector Centrality daher um einen Parameter β, der die maximal erlaubte Pfaddistanz definiert und positive wie negative Werte haben kann: $C_\beta(i,\alpha,\beta)=\sum_j(\alpha+\beta C_\beta(j,\alpha,\beta))a_{ij}$[5]. Ein positiver β-Wert erhöht die Zentralität eines Knotens in dem Maße, in dem er mit hochbewerteten Knoten verbunden ist, die maximal β Schritte vom betrachteten Akteur entfernt sind. Entsprechend vermindert sich die Zentralität des betrachteten Knotens bei einem negativen β-Wert, so dass semi-periphere Knoten einen höheren Zentralitätswert erhalten. Bonacich und Lloyd (2004) führen eine weitere Verallgemeinerung ein, welche auch negative Relationen berücksichtigt.

2.1.5 Entropy Centrality (Tutzauer 2007)

Entropy Centrality basiert auf Shannon's (1948) informationstheoretischem Modell von Kommunikation. Wie bei Information Centrality ist auch hier die Grundannahme, dass Interaktionsprozesse in einem Netzwerk nicht nur entlang kürzester Pfade verlaufen. Im Unterschied zu Information Centrality, das (wie Closeness) ein rein distanz-basiertes Maß ist, betrachtet Entropy Centrality die Wahrscheinlichkeiten, mit denen Pfade von einem betrachteten Knoten i zu einem beliebigen Knoten j im Graphen beschritten werden. Die Übergangswahrscheinlichkeit $\tau^{(ij)}(k)$ von i auf einen Nachfolgerknoten k auf einem Pfad von i nach j ist definiert als der Kehrwert des *downstream degrees* von k (k's Degree, vermindert um die Zahl seiner auf dem Weg von i nach j bereits besuchten Nachbarn). Das Produkt der Übergangswahrscheinlichkeiten für alle Knoten auf dem Pfad ergibt dann die einzelne Pfadwahrscheinlichkeit und die Summe der einzelnen Pfadwahrscheinlichkeiten für alle Pfade zwischen i und j die Gesamtwahrscheinlichkeit P_{ij}, mit der ein bei i startender network flow bei j ankommt: $P_{ij}=\sum_{(ij)}\prod_{i\leq k\leq j}\tau^{(ij)}(k)$. Die Entropie-Zentralität $C_E(i)$ eines Knotens i schließlich ist die Kumulation der Pfadwahrscheinlichkeiten für alle (i,j)-Paarungen und wie folgt definiert: $C_E(i)=-\sum_j P_{ij}\log P_{ij}$. Das auf Maximum-Entropie normalisierte Maß ist $C'_E(i)= C_E(i)/\log n$. Entropie-Zentralität entspricht somit der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Knoten andere Knoten im Netzwerk erreicht. Diese vermindert sich, wie bei Closeness und Information Centrality, mit der Distanz zu anderen Knoten. Ein wesentlicher Unterschied zu Closeness und Information Centrality ist jedoch, dass sich die Zentralität eines Knotens auch mit dem Vorhandensein von Optionen intermediärer Knoten vermindert.

Ein verwandtes Zentralitätsmodell ist die von Noh und Rieger (2004) vorgeschlagene *Random Walk Centrality*, die nicht von einer bekannten Pfadstruktur ausgeht und den network flow daher als random walk modelliert. Der Unterschied zu Entropy Centrality ist hier, dass die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Knoten i auf einen Nachfolgerknoten k eine Funktion des Gesamt-Degrees von k's Vorgängerknoten i ist.

---

[5] α ist hier eine normalisierende Konstante.

2.2 Mediale Maße

2.2.1 Betweenness (Bavelas 1948, Shimbel 1953, Anthonisse 1971, Freeman 1977)

Betweenness misst das Ausmaß, in dem ein Knoten auf kürzesten Pfaden *zwischen* anderen Knoten im Graphen positioniert ist. Der Fokus liegt hier also auf der strukturellen Abhängigkeit eines Knotenpaares (i,j) von einem dritten Knoten k, der zwischen i und j lokalisiert ist. Diese Abhängigkeit nimmt allerdings in dem Maße ab, in dem kürzeste Pfade zwischen i und j existieren, die k nicht enthalten. Die Paarabhängigkeit $\delta_{ij}(k)$ zweier Knoten i und j von einem dritten Knoten k ist daher definiert als das Verhältnis der Anzahl $\sigma_{ij}(k)$ der i und j verbindenden kürzesten Pfade mit k zur Anzahl σ_{ij} aller zwischen i und j existierenden kürzesten Verbindungen: $\delta_{ij}(k)=\sigma_{ij}(k)/\sigma_{ij}$. Die Betweenness $C_B(k)$ von k ergibt sich dann aus der Summe aller Paarabhängigkeiten mit k für alle ungeordneten Knotenpaare (i,j): $C_B(k)=\sum_{i,j}\delta_{ij}(k)$[6]. Das auf den Maximalwert normierte Maß ist $C'_B(k)=C_B(k)/(n^2\text{-}3n+2)$. Je häufiger ein Knoten eine solche intermediäre Rolle für andere Knotenpaare spielt, je häufiger er also als „Schnittstelle“ zwischen anderen Knoten benötigt wird oder sogar die Rolle eines „cutpoint“ zwischen ansonsten unverbundenen Substrukturen einnimmt, desto zentraler ist er nach dem Betweenness-Maß. Betweenness gilt daher als Gradmesser für das Potential an Kontrollmöglichkeiten im Netzwerk (Freeman 1977, 1978/79, 1980). Empirische Untersuchungen stellen allerdings eine starke Zufallsanfälligkeit der Betweenness-Zentralität fest (Trappmann et al. 2005; Kim und Jeong 2007; vgl. auch Mutschke 2008).

Borgatti und Everett (2006) und Brandes (2008) diskutieren einige Betweenness-Varianten, von denen insbesondere *k-Betweenness*, das nur Pfade der maximalen Länge k berücksichtigt, und *Length-Scaled Betweenness*, das Pfade im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Länge gewichtet, hervorzuheben sind. Die von Everett und Borgatti (2005a) vorgeschlagene *Ego Network Betweenness* ist eine sinnvolle Variante bei sehr großen Netzwerken. Everett und Borgatti zeigen, dass Ego Network Betweenness eine gute Approximation von Betweenness für viele reale Netzwerke liefert. *Reachability-based **F**-Measure* (Borgatti 2006) evaluiert den Beitrag eines Knotens zur Netzwerkkohäsion, indem der Anteil der unverbundenen Paare nach Entfernung des betrachteten Knotens gemessen wird.

2.2.2 Flow Betweenness (Freeman et al. 1991)

Flow Betweenness ist nicht auf kürzeste Pfade beschränkt, sondern betrachtet, wie Information und Entropy Centrality, alle kantendisjunkten Pfade. Flow Betweenness basiert auf dem graphentheoretischen Konzept des *maximalen Flusses* zwischen einem Quellknoten s und einem Zielknoten t. Die Ausgangsüberlegung hierbei ist, dass die Interaktion zwischen Knoten eine beschränkte Belastbarkeit hat, d.h. die Kanten sind mit der maximalen Kapazität der Interaktion zwischen den jeweiligen Knoten gewichtet. Ein *maximaler Fluss* zwischen s und t entspricht einer optimalen Verteilung der Lasten auf alle s und t verbindenden Pfade, so dass es zu einer maximalen Auslastung der Pfade, an keiner Kante aber zu einer Kapazitätsüberschreitung kommt. Der Wert m_{st} des maximalen Flusses zwischen s und t entspricht der Summe der Belegungen aller aus s ausgehenden Kanten, die in dem Fluss enthalten sind. Flow Betweenness $C_{FB}(k)$ misst nun das Ausmaß, in dem maximale Flüsse

[6] Das Maß ist auch auf unverbundene Netzwerke anwendbar, wobei $\delta_{ij}(k)=0$, falls $\sigma_{ij}=0$ (Freeman 1977), sowie auf gerichtete Graphen (White und Borgatti 1994).

zwischen Knoten im Netzwerk von einem intermediären Knoten k abhängen. Dies ist die Summe der Werte $m_{st}(k)$ der maximalen Flüsse zwischen Knoten s und t, die über k laufen: $C_{FB}(k)=\sum_{st}m_{st}(k)$. Das auf den gesamten Flow zwischen allen Knotenpaaren normierte Maß ist $C'_{FB}(k)= C_{FB}(k)/\sum_{st}m_{st}$. Flow Betweenness ist für gewichtete Graphen definiert, eignet sich aber auch für ungewichtete Graphen (jede Kante ist dann mit 1 gewichtet). Flow Betweenness kann z.B. im Falle eines Gatekeeping durch einen cutpoint (Freeman 1980) eine Möglichkeit sein, einen alternativen Weg über andere zentrale Knoten zu finden.

Koschützki et al. (2005) schlagen eine Variante vor, die berücksichtigt, dass es zwischen zwei Knoten mehrere maximale Flüsse geben kann, entsprechend den Möglichkeiten, eine Last optimal zu verteilen. Dieses *Max-Flow Betweenness Vitality* genannte Maß kalkuliert die unterschiedlichen, über k laufenden Möglichkeiten für maximale Flüsse, indem k aus dem Graphen entfernt und der Wert eines maximalen Flusses ohne k vom Ausgangswert $m_{st}(k)$ abgezogen wird. Je kleiner der Wert des verbleibenden Flusses (ohne k), desto größer die Abhängigkeit von k und somit k's Flow Betweenness.

2.2.3 Random Walk Betweenness (Newman 2003)

Random Walk Betweenness knüpft wie Flow Betweenness ebenfalls an die Grundannahme an, dass Interaktionsprozesse in einem Netzwerk nicht nur entlang kürzester Wege verlaufen. Im Unterschied zu Flow Betweenness, das die Pfadstruktur zwischen Quell- und Zielknoten kennen muss, um optimale Routen berechnen zu können, geht Random Walk Betweenness von einem Szenario aus, wo die Pfadstruktur des Netzwerkes nicht a priori bekannt ist: Knoten s hat eine Nachricht für Knoten t, kennt die kürzesten Wege zu t aber nicht, so dass s die Nachricht für t an einen zufällig ausgewählten benachbarten Knoten weitergibt. Der Transfer durch den Graphen ist also als *random walk* modelliert. Die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Knoten i auf einen Nachfolgerknoten k ist hier definiert als der Kehrwert des Degrees von k's Vorgängerknoten i. Random Walk Betweenness $C_{RWB}(k)$ ist dann die Summe der Wahrscheinlichkeiten $P_s(k)$ für einen intermediären Knoten k, in random walks zwischen Knoten s und t involviert zu sein: $C_{RWB}(k)=\sum_{s<t}P_s(k)$. Das auf den Maximalwert normierte Maß ist $C'_{RWB}(k)= C_{RWB}(k)/(1/2n(n\text{-}1))$. Das Random-Walk-Modell betrachtet somit grundsätzlich *alle* (zyklenfreien) Wege im Graphen, favorisiert allerdings eindeutig kürzeste Pfade, da t über kürzeste Pfade „schneller“ erreicht wird.

3 Prestigemaße

Der Begriff „Prestige“ wird nur für solche Zentralitätsmaße verwendet, die auf Beziehungen beruhen, die auf den jeweils betrachteten Knoten *gerichtet* sind (Knoke und Burt 1983; Wasserman und Faust 1994). Sie finden also nur in gerichteten Netzwerken und dort auch nur in den Fällen Anwendung, wo der betrachtete Knoten *Rezipient* von Verbindungen ist, die von anderen ausgehen. In der Literatur wird für diese Fälle gerne die Metapher „Wahl“ benutzt, in dem Sinne, dass der betrachtete Akteur von anderen „gewählt“ wird (gelegentlich ist auch von „Feedback“ bzw. Feedbackmaßen die Rede, s. Koschützki et al. 2005). Ein Knoten ist also in dem Maße prestigereich, in dem er Objekt positiver gerichteter Beziehungen ist. Prestigemaße evaluieren demnach das Ausmaß an „Achtung“, das ein Akteur von anderen Akteuren im Netzwerk bezieht (vgl. Jansen 2003).

3.1 Degree-Prestige (Knoke und Burt 1983, Wasserman und Faust 1994)

Degree-Prestige misst die Zahl der direkt auf den betrachteten Knoten gerichteten Beziehungen bzw. die Zahl der empfangenen „Wahlen" und entspricht somit dem *In-Degree* eines Knotens. Ein Akteur ist demnach dann prestigereich, wenn er von vielen anderen direkt „gewählt" wird. Zu beachten ist, dass sich Degree und Degree-Prestige eines Akteurs diametral gegenüber stehen können. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein wissenschaftlicher Autor viele andere Autoren zitiert (hoher Degree), selbst aber nicht zitiert wird (Degree-Prestige von 0). Prestigemaßzahlen messen daher nicht nur den Grad der Einbettung eines Akteurs in das Beziehungsgeflecht eines Netzwerkes, im Fokus steht vielmehr die sich aus der Wertschätzung anderer ergebende „*Ungleichheit* zwischen den Akteuren" (Jansen 2003).

3.2 Proximity-Prestige (Knoke und Burt 1983, Wasserman und Faust 1994)

Proximity-Prestige evaluiert neben den direkten auch die indirekten, auf einen betrachteten Knoten gerichteten Beziehungen. Analog zum nähebasierten Zentralitätsmaß Closeness betrachtet Proximity-Prestige die Distanz eines Knotens i zu allen anderen Knoten j im Netzwerk. Dabei werden jedoch nur kürzeste, aus gleichgerichteten Kanten bestehende Pfade berücksichtigt, die von j nach i laufen (*In-Closeness*). Betrachtet wird also die inverse Distanz $d(j,i)$ von Knoten j zum betrachteten Knoten i. Im Unterschied zu Closeness wird nicht die Summe der Distanzen, sondern die durchschnittliche Länge der Pfade gemessen, was das Maß auch für unverbundene Netzwerke anwendbar macht.

3.3 Rank-Prestige (Knoke und Burt 1983, Wasserman und Faust 1994)

Rank-Prestige entspricht einer Anwendung der Eigenvektor-Zentralität auf gerichtete Graphen. Das Prestige eines Akteurs ist also eine Funktion des Prestiges der ihn „wählenden" Akteure. Das Konzept des Rank-Prestige quantifiziert demnach nicht nur den reinen (direkten oder indirekten) „Wahlerfolg" eines Akteurs, sondern auch seinen „Rang" innerhalb einer Menge von Akteuren, der sich nach dem Ausmaß bemisst, in dem er von seinerseits prestigereichen Akteuren „gewählt" wird. Rank-Prestige ist somit die gewichtete Summe der In-Degrees, die ein Akteur von anderen Knoten erhält.

4 Diskussion

4.1 Anwendungsaspekte von Zentralitätsmaßen

In der Netzwerkforschung allgemein akzeptiert ist die Auffassung, dass die unterschiedlichen Ansätze von Zentralität eine beträchtliche konzeptionelle Überlappung haben, so dass sie sich nicht wechselseitig ausschließen, sondern sich eher komplementär ergänzen (vgl. Borgatti und Everett 2006; Friedkin 1991; Valente et al. 2008). Diese konzeptionellen Verwandtschaften spiegeln sich auch in empirischen Korrelationsanalysen wider. Generell belegen die Studien starke, aber variierende Korrelationen zwischen den Maßen, so dass man von einer Redundanz der Maße nicht sprechen kann (Valente et al. 2008). Bei genauerer Betrachtung gibt es in der Regel immer eine kleinere Zahl von Knoten, wo die Maße zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen kommen (vgl. Newman 2003). In der Anwendung kommt es dann darauf an, diese Unterschiede herauszuarbeiten. Grundsätzlich aber ist Zentralität als multidimensionales Konzept zu begreifen, das alle Maße braucht, um ein vollständiges Bild von dem Beitrag eines Akteurs zum Netzwerk zu erhalten (vgl. Borgatti und Everett 2006; Freeman 1978/79). Die Wahl zwischen verschiedenen Zentralitätskonzepten ist daher eher als Wahl zwischen den verschiedenen *Rollen* zu sehen, die die Akteure im Netzwerk spielen. Während radiale Maße den Beitrag zur Kohäsion innerhalb von Gruppen evaluieren, messen mediale Maße das Ausmaß, in dem Brückenfunktionen zwischen Gruppen wahrgenommen werden (Borgatti und Everett 2006). Das Rollenmodell des Anwendungskontextes ist daher ein wichtiger Faktor für die Wahl des „richtigen“ Maßes.

Ein ebenso wichtiger Anwendungsaspekt ist die kohäsive Struktur des betrachteten Netzwerkes. Generell gehen Borgatti und Everett (2006) davon aus, dass radiale Maße am besten interpretierbar sind, wenn das Netzwerk auch eine ausgeprägte Core-Peripherie-Struktur hat, während mediale Maße sich am besten eignen, wenn das Netzwerk kohäsive Substrukturen hat, die nur locker miteinander verbunden sind[7]. Hinweise für die Kompatibilität eines konkreten Netzwerkes mit dem für das jeweilige Zentralitätsmaß idealen Modell eines Netzwerkes liefern die von Freeman (1978/79) eingeführten Zentralisierungsmaße sowie die von Everett und Borgatti (2005b) vorgeschlagenen Core-Peripherie-Maße.

Der wohl wichtigste Faktor bei der Wahl des Maßes aber ist die Beschaffenheit des den Interaktionradius der Akteure definierenden *network flow*. Borgatti (2005) stellt in einer Simulationsstudie fest, dass Zentralitätsmaße nur für die Flow-Prozesse voll anwendbar sind, für die sie auch konzipiert wurden. Demnach hängt die Wahl zwischen proximity- und connectivity-orientierten Maßen oder gar Random-Walk-Modellen ganz entscheidend von den Annahmen des Anwendungskontextes über den network flow ab.

4.2 Netzwerkeffekte von Zentralität

Eine wichtige Implikation *struktureller* Zentralitätsmaße ist, dass nicht die tatsächliche Netzwerkaktivität (der tatsächlich ausgeübte Einfluss) im Fokus steht, sondern das Interaktions*potential* (Bonacich 1972; Freeman 1978/79), das einem Akteur aufgrund seiner stra-

[7] In diesem Zusammenhang zu beachten sind auch Aspekte der Robustheit der Maße, insbesondere bei großen und weniger dichten Netzwerken (vgl. Borgatti et al. 2006; Kim und Jeong 2007; Zemljič und Hlebec 2005).

tegischen Position im Netzwerk zukommt. Dennoch hat die Frage, welche Effekte zentrale Positionen auf Netzwerkprozesse haben, in der Netzwerkforschung stets eine Rolle gespielt. So wurde bereits in der Pionierarbeit von Bavelas (1950) ein Zusammenhang zwischen der Nennung von Führungspersonen und der Zentralität dieser Personen in Kommunikationsnetzwerken festgestellt. Freeman et al. (1979/80) bestätigen diesen Zusammenhang für Betweenness-Zentralität. Auch die jüngere Forschung stellt einen signifikanten Zusammenhang zwischen Akteurszentralität und anderen Qualitätsfaktoren fest. So belegen, um zwei Studien aus ganz unterschiedlichen Forschungsfeldern zu nennen, Sparrowe et al. (2001) einen Zusammenhang zwischen der Zentralität von Teammitgliedern und deren Erfolg; Mutschke und Quan-Haase (2001) bestätigen eine hohe Korrelation zwischen zentraler Positionierung von Autoren in Ko-Autorennetzwerken und der Zentralität der von diesen Autoren behandelten Themen in Themennetzwerken.

Aber auch in struktureller Hinsicht wird, allerdings kontrovers, diskutiert, ob das Potential einer zentralen Position auch mit (tatsächlicher) Macht korrespondiert. Während für viele traditionelle Netzwerkforscher Zentralität und Macht äquivalente Kategorien sind, gehen viele Exchange-Networks-Forscher von gänzlich unterschiedlichen Konzepten aus. So zeigen Mizruchi und Potts (1998), dass das Verhältnis zwischen Zentralität und Macht stark von der Parität der Untergruppen im Netzwerk abhängt. Friedkin und Johnson (1997) entwickeln ein formales Modell sozialen Einflusses, das nicht von Zentralität, sondern von struktureller Äquivalenz ausgeht (vgl. auch Burt's (1982) Prestigemodell auf der Basis von Statusgruppen). Diese Arbeiten werfen die Frage auf, ob und wie Zentralität mit anderen positionalen Merkmalen von Akteuren sozialer Netzwerke (wie z.B. struktureller Äquivalenz) sinnvoll kombiniert werden kann.

4.3 „Skalierbarkeit“[8] von Zentralitätsmaßen

Die hier diskutierten Maße wurden auf der Basis kleiner Netzwerke entwickelt und evaluiert. Mit den Möglichkeiten der modernen Computertechnologie ist jedoch auch das Interesse an der Analyse sehr großer Netzwerke (wie z.B. des Internets) gestiegen. Hier zeigt sich allerdings, dass die Maße sowohl verfahrenstechnisch als auch konzeptionell an ihre Grenzen stoßen. So argumentieren Everett und Borgatti (2005a), dass die Berechnung von z.B. Closeness auf der Basis eines 10.000-Knoten-Netzwerkes (inhaltlich) kaum noch Sinn macht. Everett und Borgatti schlagen vor, nicht Gesamtnetzwerke, sondern lokale Netzwerke zu analysieren (z.B. Ego-Network-Betweenness). Mutschke (2008) dagegen konstatiert, dass herkömmliche Zentralitätsmaße neue Erkenntnisse der Theoretischen Physik über die strukturelle Beschaffenheit sozialer Netzwerke nicht berücksichtigen, wie insbesondere deren Tendenz zur Community-Bildung (Albert und Barabasi 2002; Watts 1999). Unplausible Zentralitätswerte bei großen Netzwerken sind demnach nicht ein Problem der Netzwerkgröße, sondern *Anomalien*, die die Inkompatibilität widerspiegeln zwischen dem, was Zentralitätsmaße messen und dem, was (große) Netzwerke strukturell tatsächlich repräsentieren. Mutschke schlägt daher ein Mehrebenenmodell vor, dass Zentralität auf der Basis

[8] Skalierbarkeit meint hier nicht das Verhalten einer Software bezüglich ihres Ressourcenbedarfs bei steigender Last, sondern die Leistungsfähigkeit der Maße bei zunehmender Netzwerkgröße.

der Community-Struktur eines Netzwerkes evaluiert[9]. Die Entwicklung gut „skalierender" Zentralitätsmaße ist allerdings nach wie vor ein Forschungsdesiderat.

4.4 *Dynamische Zentralität*

Ein weiteres grundsätzliches Problem ist, dass die bisher in der Netzwerkforschung verbreiteten Zentralitätsmaße ausschließlich statische Netzwerke betrachten. Soziale Netzwerke entwickeln sich jedoch in der Regel über Zeit, so dass man davon ausgehen muss, dass sich auch Positionen im Netzwerk über Zeit verändern. Aber auch innerhalb eines bestehenden Netzwerkes können die *tatsächlich* ablaufenden Interaktionsprozesse andere Wege nehmen als von den Zentralitätsmaßen prognostiziert. Während „real existierende" Zentralität durch ein dynamisches Flow-Modell operationalisiert werden kann, das z.B. evaluiert, wie oft etwas über einen Knoten oder wie schnell etwas zu einem Knoten fließt (Borgatti 2005), steht die Evaluation von Zentralität über Zeit vor der Schwierigkeit, dass es hierzu noch keine allgemeinen formalen Modelle gibt, die mit der temporären Existenz von Kanten *und* Knoten umgehen können. Die Forschung hierzu steht noch ganz am Anfang (vgl. Brandes 2008). Gelegentlich diskutierte Modelle, die auf der Kumulation der Ergebnisse von Zeitscheibenanalysen beruhen oder Zentralität auf der Basis von gewichteten Graphen berechnen, wo Kanten mit zeitlichen Werten (z.B. Zeitintervallangaben) bewertet sind, sind rein pragmatische Ansätze, da sie lediglich Anwendungen der herkömmlichen Zentralitätsmaße auf zeitspezifische Settings sind, das Grundproblem der zeitlichen Dynamik von Netzwerken aber nicht lösen.

4.5 *Theoriedefizit*

Das Hauptproblem ist allerdings die defizitäre theoretische Fundierung der vorgeschlagenen Zentralitätskonzepte. Mit Ausnahme vielleicht von Tutzauer's Entropie-Modell ist keines der hier präsentierten Maße wirklich aus einer übergeordneten allgemeinen Theorie abgeleitet (vgl. Friedkin 1991; vgl. auch Freeman 1978/79).[10] Die meisten Maße haben sich aus Überlegungen ergeben, die bezüglich der Datenstruktur des Graphen angestellt wurden und sind somit lediglich „ad hoc formalizations of plausible ideas" (Friedkin 1991). Eine rein hypothetische Konzeptualisierung von „Zentralität" wirft jedoch das Problem eines interpretativen Defizits bezüglich des behaupteten positionalen Status' der Akteure auf. Beispielhaft sei hierzu auf die konträre Interpretation der Position des „Dazwischenseins" bei Shimbel (1953) und Freeman (1977) hingewiesen: Die gleiche strategische Position wird von Shimbel (negativ) als „stress" interpretiert, von Freeman dagegen (positiv) als Vorhandensein von Kontrollpotential. Was also fehlt, sind so etwas wie Theorien der „Wichtigkeit" von Akteuren in sozialen Netzwerken, die auch die der Netzwerkformung

---

[9] Vgl. vor diesem Hintergrund auch die von Everett und Borgatti (1999, 2005b) vorgeschlagenen Maße für Gruppenzentralität.

[10] Wobei Freeman (1978/79) die Einführung von Maßen als einen *Weg* versteht, der zunächst einmal beschritten werden müsse, um „Zentralität" überhaupt verstehen zu können. Friedkin (1991) greift immerhin auf ein Prozessmodell der sozialen Beeinflussung zurück, um daraus drei Zentralitätsmaße abzuleiten (*Total*, *Immediate* und *Mediative Effects Centrality*). Die Maße korrespondieren allerdings im Wesentlichen mit Degree- bzw. Eigenvector Centrality, Closeness und Betweenness (vgl. Wasserman und Faust 1994).

zugrundeliegenden, strukturgenerierenden Kräfte[11] berücksichtigen und aus denen dann Zentralitätskonzepte abgeleitet werden könnten, deren Ergebnisse im Lichte dieser Theorien eindeutiger interpretierbar wären. Hier gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf. Ohne theoretische Einbettung jedoch bleibt ein Zentralitätsmaß letztlich nichts weiter als ein methodisches *Angebot*, die eigentliche Kernfrage jedoch – „Was ist Zentralität?" – vermutlich unbeantwortet.

5 Literatur

Anthonisse, JacM., 1971: The rush in a graph. Amsterdam: Mathematisch Centrum mimeo.

Albert, Reka und *Alberto-Laszlo Barabási*, 2002: Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics 74: 47-97.

Bavelas, Alex, 1948: A mathematical model for group structure. Applied Anthropology 7: 16-30.

Bavelas, Alex, 1950: Communication patterns in task oriented groups. Journal of the Acoustical Society of America 22: 271-282.

Beauchamp, Murray A., 1965: An improved index of centrality. Behavioral Science 10: 161-163.

Bonacich, Phillip, 1972: Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. Journal of Mathematical Sociology 2: 113-120.

Bonacich, Phillip, 1987: Centrality and power: a family of measures. American Journal of Sociology 92: 1170-1182.

Bonacich, Phillip und *Paulette Lloyd*, 2001: Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations. Social Networks 23: 191-201.

Bonacich, Phillip und *Paulette Lloyd*, 2004: Calculating status with negative relations. Social Networks 26: 331-338.

Borgatti, Stephen P., 2005: Centrality and network flow. Social Networks 27: 55-71.

Borgatti, Stephen P., 2006: Identifying sets of key players in a social network. Computational and Mathematical Organization Theory 12: 21–34.

Borgatti, Stephen P. und *Martin Everett*, 2006: A Graph-theoretic perspective on centrality. Social Networks 28: 466-484.

Borgatti, Stephen P., *Kathleen M. Carley* und *David Krackhardt*, 2006: On the robustness of centrality measures under conditions of imperfect data. Social Networks 28: 124-136.

Brandes, Ulrik und *Daniel Fleischer*, 2005: Centrality measures based on current flow. S. 533-544 in: *Volker Diekert* und *Bruno Durand* (Hg.), STACS 2005, LNCS 3404. Berlin-Heidelberg: Springer.

Brandes, Ulrik, 2008: On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. Social Networks 30: 136-145.

Burt, Ronald S., 1982: Towards a structural theory of action. New York: Academic Press.

Everett, Martin G. und *Stephen P. Borgatti*, 1999: The centrality of groups and classes. Journal of Mathematical Sociology 23: 181-201.

Everett, Martin G. und *Stephen P. Borgatti* 2005a: Ego network betweenness. Social Networks 27: 31-38.

Everett, Martin G. und *Stephen P. Borgatti*, 2005b: Extending centrality. S. 57-76 in: *Peter J. Carrington*, *John Scott* und *Stanley Wassermann* (Hg.), Models and methods in social network analysis. Cambridge: Cambridge University Press.

Freeman, Linton C., 1977: A set of measures of centrality based on betweenness. Sociometry 40: 35-41.

[11] Vgl. die Diskussion bei Borgatti und Everett 2006

Freeman, Linton C., 1978/79: Centrality in social networks: Conceptual clarification. Social Networks 1: 215-239.

Freeman, Linton C., 1980: The gatekeeper, pair-dependency and structural centrality. Quality and Quantity 14: 585-592.

Freeman, Linton C., 2008: Going the wrong way on a one-way street: Centrality in Physics and Biology. Journal of Social Structure 9.

Freeman, Linton C., *Stephen P. Borgatti* und *Douglas R. White*, 1991: Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow. Social Networks 13; 141-154.

Freeman, Linton C., *Douglas Roeder* und *Robert R. Mulholland*, 1979/80: Centrality in social networks: II. Experimental results. Social Networks 2: 119-141.

Friedkin, Noah E., 1991: Theoretical foundations for centrality measures. American Journal of Sociology 96: 1478-1504.

Friedkin, Noah E. und *Eugene Johnson*, 1997: Social positions in influence networks. Social Networks 19: 209-222.

Hage, Per und *Frank Harary*, 1995: Eccentricity and centrality in networks. Social Networks 17: 57-63.

Hubbell, Charles H., 1965: An input-output approach to clique identification. Sociometry 28: 377-399.

Jansen, Dorothea, 2003: Einführung in die Netzwerkanalyse. 2. Auflage. Opladen: Leske+Budrich.

Katz, Leo, 1953: A new status index derived from sociometric analysis. Psychometrika 18: 39-43.

Kim, Pan-Jun und *Hawoong Jeong*, 2007: Reliability of rank order in sampled networks. European Physical Journal 55: 109-114.

Knoke, David und *Ronald S. Burt*, 1983: Prominence. S. 195-222 in: *Ronald S. Burt* und *Michael J. Minor* (Hg.), Applied Network Analysis. Newbury Park, CA: Sage: 195-222.

Koschützki, Dirk, *Katharina A. Lehmann*, *Leon Peeters*, *Stefan Richter*, *Dagmar Tenfelde-Podehl*, *Oliver Zlotowski*, 2005: Centrality Indices. S. 16-61 in: *Ulrik Brandes* und *Thomas Erlebach* (Hg.), Network Analysis. Methodological Foundations. Lecture Notes in Computer Science 3418. Berlin-Heidelberg: Springer.

Latora, Vito und *Massimo Marchiori*, 2007: A measure of centrality based on network efficiency. New Journal Physics 9: 188.

Mizruchi, Mark S. und *Blyden B. Potts*, 1998: Centrality and power revisited: actor success in group decision making. Social Networks 20: 353-387.

Mutschke, Peter und *Anabel Quan-Haase*, 2001: Collaboration and Cognitive Structures in Social Science Research Fields: Towards Socio-Cognitive Analysis in Information Systems. Scientometrics 52: 487-502.

Mutschke, Peter, 2008: Zentralitätsanomalien und Netzwerkstruktur. Ein Plädoyer für einen „engeren“ Netzwerkbegriff und ein community-orientiertes Zentralitätsmodell. S. 262-272 in: *Christian Stegbauer* (Hg.), Netzwerkanalyse und Netzwerktheorie. Wiesbaden: VS-Verlag für Sozialwissenschaften.

Newman, Mark E. J., 2003: A measure of betweenness centrality based on random walks. arXiv:cond-mat/0309045 (auch erschienen in Social Networks 27 (2005): 39-54.

Nieminen, Juhani, 1974: On centrality in a graph. Scandinavian Journal of Psychology 15: 322-336.

Noh, Jae Dong und *Heiko Rieger*, 2004: Random walk on complex networks. Physical Review Letters 92.

Sabidussi, Gert, 1966: The centrality index of a graph. Psychometrika 31: 581-603.

Sade, Donald S., 1989: Sociometrics of macaca mulatta III: N-path centrality in grooming networks. Social Networks 11: 273-292.

Shimbel, Alfonso, 1953: Structural parameters of communication networks. Bulletin of Mathematical Biophysics 15: 501-507.

Shannon, Claude E., 1948: A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal 27: 379-423, 623-656.

Shaw, Marvin E., 1954: Group structure and the behavior of individuals in small groups. Journal of Psychology 38: 139-149.

Sparrowe, Raymond T., *Robert C. Liden*, *Sandy J. Wayne*, und *Maria L. Kraimer*, 2001: Social networks and the performance of individuals and groups. Academy of Management Journal 44: 316-325.

Stephenson, Karen und *Marvin Zelen*, 1989: Rethinking centrality: methods and examples. Social Networks 11: 1-37.

Tam, Tony, 1989: Demarcating the boundaries between self and the social: the anatomy of centrality in social networks. Social Networks 11: 387-401.

Trappmann, Mark, *Hans J. Hummell* und *Wolfgang Sodeur*, 2005: Strukturanalyse sozialer Netzwerke. Konzepte, Modelle, Methoden. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Tutzauer, Frank, 2007: Entropy as a measure of centrality in networks characterized by path-transfer flow. Social Networks 29: 249-265.

Valente, Thomas W. und *Robert K. Foreman*, 1998: Integration and radiality: measuring the extent of an individual's connectedness and reachability in a network. Social Networks 20: 89-105.

Valente, Thomas W., *Kathryn Coronges*, *Cynthia Lakon* und *Elizabeth Costenbader*, 2008: How correlated are network centrality measures? Connections 28: 16-26.

Wasserman, Stanley, *Katherine Faust*, 1994: Social Network Analysis. Methods and Applications. Structural Analysis in the Social Sciences 8. Cambridge: Cambridge University Press.

Watts, Duncan J., 1999: Small Worlds. Princeton: Princeton University Press.

White, Douglas R. und *Stephen P. Borgatti*, 1994: Betweenness centrality measures for directed graphs. Social Networks 16: 335-346.

White, Scott und *Padhraic Smyth*, 2003: Algorithms for estimating relative importance in networks. Proc. 9th ACM SIGKDD Conference, Washington: 266-275.

Zemljič, Barbara und *Valentina Hlebec*, 2005: Reliability of measures of centrality and prominence. Social Networks 27: 73-88.