

Analyse des OpenPGP Web of Trust

Studienarbeit
von

Alexander Ulrich

Diskrete Mathematik
Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik
Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften
Universität Tübingen

Erstgutachter: Prof. Dr. Peter Hauck
Betreuer Mitarbeiter: Dipl.-Inform. Ralph Holz

Bearbeitungszeit: 08. Monat 2009 – 05. Monat 2010

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Tübingen, den 14. Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Kryptographie mit öffentlichen Schlüsseln	5
2.1.1 Ziele von Kryptographie	5
2.1.2 Prinzip	6
2.1.3 Authentisierung von Schlüsseln	7
2.1.3.1 Hierarchische Public-Key-Infrastruktur mit X.509	8
2.1.4 Kryptographische Hashfunktionen	8
2.2 PGP/GnuPG	9
2.2.1 Web of Trust	10
2.2.2 Struktur von OpenPGP-Paketen	11
2.2.3 Das GnuPG-Vertrauensmodell	11
2.2.4 Das Keyserver-Netzwerk	14
2.2.5 Zustandekommen von Signaturen im Web of Trust	16
2.2.5.1 Übliche Zertifizierungsprozeduren	16
2.2.5.2 Certificate Authorities im Web of Trust	17
2.2.5.3 Keysigning-Parties	17
2.2.5.4 PGP im Debian-Projekt	18
2.3 Graphentheorie und Netzwerkanalyse	18
2.3.1 Graphentheorie allgemein	18
2.3.2 Netzwerkstatistiken	19
2.3.3 Soziale Netzwerke	21
2.3.4 Small-World-Effekt	22
2.3.5 Skalenfreie Netzwerke	22
2.3.6 Communities	23
2.3.6.1 Grundlegende Begriffe	23
2.3.6.2 Algorithmus von Girvan/Newman	23
2.3.6.3 Modularity	24
2.3.6.4 Weitere Algorithmen	25
3 Methoden und Materialien	27
3.1 Software	27
3.1.1 Warum eigene Software?	27
3.1.2 Design und Implementierung	29

3.1.2.1	Der SKS-Keyserver	29
3.1.2.2	Datenextraktion	30
3.1.2.3	Datenauswertung	32
3.2	Schlüssel und Individuen	33
3.3	Community-Analyse	33
3.3.1	Vorgehensweise	33
3.3.2	Communities im gerichteten Graphen	35
3.3.3	Communities im ungerichteten Graphen	35
3.3.4	Überlappende Communities im ungerichteten Graphen	36
4	Ergebnisse und Diskussion	37
4.1	Datensatz	37
4.2	Strukturelle Merkmale des Netzwerkes	38
4.2.1	Starke Zusammenhangskomponenten	38
4.2.2	Netzwerkstatistiken der größten starken Zusammenhangskomponente	40
4.2.2.1	Gegenseitigkeit von Kanten	40
4.2.2.2	Clustering und Small-World	41
4.2.2.3	Verteilung der Grade, Skalenfreiheit	43
4.2.3	Robustheit	44
4.2.4	Nützlichkeit	47
4.3	Communities	49
4.3.1	Ergebnisse für den gerichteten Graphen	49
4.3.2	Ergebnisse für den ungerichteten Graphen	50
4.3.3	Struktur der Communities	52
4.3.4	Inhaltliche Analyse	53
4.3.5	Kriterium für KSPs	57
4.3.6	Diskussion	58
4.4	Zeitliche Entwicklung des Schlüsselbestandes	62
4.5	Verwendung von Public-Key- und Hashalgorithmen	64
4.6	Verwandte Arbeiten	65
5	Zusammenfassung und Ausblick	67
A	Schema der Tabellen	71
B	Analysewerkzeuge	73
	Literaturverzeichnis	75

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiel für die Berechnung der Gültigkeit von Schlüsseln (Raute: volles/ultimatives Vertrauen, Quadrat: geringes Vertrauen, Kreis: kein Vertrauen, schwarz: voll gültig, grau: eingeschränkt gültig, weiß: ungültig)	14
4.1	Größenverteilung der starken Zusammenhangskomponenten	38
4.2	Sternförmige Struktur der starken Zusammenhangskomponenten bis zur Größe 6 (rot = Größe 6-10, grün = Größe 11-20, blau = Größe 21-30, violett = Größe >= 31, gelb = MSCC)	39
4.3	Kumulative Verteilungsfunktion von $\frac{d^+(u)}{d^-(u)}$ für alle Knoten u in der MSCC (a). Verteilung von k_{nn} über alle ausgehenden Grade (b).	42
4.4	Verteilung der eingehenden (a) und ausgehenden (b) Knotengrade in der größten starken Zusammenhangskomponente.	43
4.5	Entwicklung der Größe der größten starken Zusammenhangskomponente, wenn Knoten zufällig oder nach absteigender Größe entfernt werden	45
4.6	Verteilung der (gerundeten) durchschnittlichen Distanzen (a) und der Eccentricity (b) in der größten starken Zusammenhangskomponente .	48
4.7	Kumulative Verteilungsfunktion der Nachbarschaftsgrößen in der größten starken Zusammenhangskomponente	49
4.8	Verteilung der Größe der Communities	51
4.9	Community mit modularen Untereinheiten (Größe 2.271, Blondel ($l = 5$), Force-directed Layout)	52
4.10	Struktur der Communities (COPRA ($v = 1$) (rot: Größe < 10, grün: Größe < 100, blau: Größe < 1000, gelb: Größe > 1000))	54
4.11	Struktur der Communities (Blondel $l = 5$) (Knotenfärbung wie in Abb.4.10)	55
4.12	Community mit zeitlicher Korrelation der Signaturen (Blondel $l = 5$), 100 Knoten, 72% der Signaturen innerhalb eines Monats)	57
4.13	Community mit zeitlicher Korrelation der Signaturen (Blondel ($l = 5$), 41 Knoten, 84 % der Signaturen innerhalb eines Monats)	58
4.14	Zuweisung von Domains zu SLDs abhängig von der Community-Größe.	59

4.15 Verteilung der Größe der von einer SLD dominierten Communities.	60
4.16 Verteilung der Größe von Communities mit zeitlicher Korrelation der Signaturen.	61
4.17 Zeitliche Entwicklung der Größe des gesamten Schlüsselbestandes (a) und der größten starken Zusammenhangskomponente (b)	62
4.18 Rate neuer PGP-Schlüssel, die RSA oder DSA benutzen, für den gesamten Schlüsselbestand (a) und die größte starke Zusammenhangskomponente (b) in monatlichen Abständen	63
A.1 Abfrage aller zum Zeitpunkt \$timestamp gültigen Signaturen	72

1. Einleitung

Die meisten Kommunikationsmedien – insbesondere E-Mail – können nicht garantieren, dass Nachrichten unterwegs abgehört, verändert oder mit gefälschtem Absender verschickt werden. PGP und GnuPG sind Softwarepakete, die – basierend auf asymmetrischer Kryptographie – Vertraulichkeit und Authentizität gewährleisten.

Asymmetrische Kryptographie erlaubt es, Schlüssel auf unsicheren Kanälen auszutauschen. Damit stellt sich aber ein neues Problem: Wie kann ein Benutzer sicherstellen, dass ein Schlüssel authentisch ist, also tatsächlich vom angeblichen Besitzer stammt? Im Kontext elektronischer Kommunikation kann dies meist nicht durch direkten Kontakt mit dem Kommunikationspartner festgestellt werden. Statt dessen müssen sich Teilnehmer auf Dritte verlassen, die Schlüssel verifizieren.

Der traditionelle Ansatz dafür besteht in der Verwendung von zentralen und hierarchischen Infrastrukturen, die sich auf wenige zentrale Autoritäten verlassen. Diese Autoritäten nehmen die Aufgabe der Verifizierung von Schlüsseln wahr. PGP setzt stattdessen auf das Paradigma der Selbstorganisierung in Form des *Web of Trust*. Mit Selbstorganisierung ist gemeint, dass ein System nicht zentral geplant wird, sondern sich ausschließlich aus den Interaktionen aller Teilnehmer ergibt. Im Web of Trust ist die Aufgabe der Verifizierung von Schlüsseln auf *alle* Teilnehmer verlagert. Diese stellen Informationen über von ihnen verifizierte Schlüssel öffentlich zur Verfügung und ermöglichen es so anderen Teilnehmern, sie zu benutzen. Auf diese Weise ergibt sich ein Netzwerk, das abbildet, welche Schlüssel (bzw. Benutzer) welche anderen Schlüssel verifiziert haben.

Eine Vielzahl von Arbeiten befasst sich mit der Analyse der Struktur großer Netzwerke, die in verschiedensten Bereichen angetroffen werden. Dies können etwa soziale, technische oder biologische Netzwerke sein. In den letzten Jahren hat insbesondere die Analyse von sozialen und technischen Netzwerken durch die Verfügbarkeit von Datensammlungen aus dem Bereich des Internets, von Online Social Networks (Facebook etc.) u.ä. einen erheblichen Auftrieb erhalten.

Das Web of Trust stellt ein Beispiel für ein solches Netzwerk dar, das sich aus der Selbstorganisierung der Teilnehmer ergibt. Auch wenn es zunächst nicht über die streng regelmäßige Struktur eines geplanten Systems verfügt, ist es auch nicht komplett unstrukturiert. Es ergeben sich Strukturen, die die Beziehungen der Teilnehmer

im realen Leben widerspiegeln. Das Netzwerk kann einerseits nur in Bezug auf die Erfüllung seines Zwecks betrachtet werden: Wie stark wird das Web of Trust benutzt und wie gut erfüllt es seinen Zweck? Andererseits kann seine Struktur benutzt werden, um die Mechanismen seiner Entstehung zu erklären. Wie finden sich die Mechanismen seiner Entstehung und die abgebildeten Beziehungen in dieser Struktur wieder? Diese Studienarbeit soll zur Beantwortung beider Fragen beitragen.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Studienarbeit ist eine Analyse der Struktur des Web of Trust auf verschiedenen Ebenen. Dazu soll zunächst eine Software implementiert werden, die das Web of Trust aus einer Schlüsseldatenbank extrahiert und in Form eines Graphen verfügbar macht.

Der dadurch erhaltene Graph soll unter mehreren Gesichtspunkten analysiert werden:

- Wie stark sind die Teilnehmer des Web of Trust vernetzt?
- Bekannt ist aus der Literatur, dass sich im Web of Trust eine starke Zusammenhangskomponente findet, die deutlich größer ist als die restlichen Komponenten. Allerdings enthält diese trotzdem nur einen kleinen Teil der insgesamt vorhandenen Schlüssel. Hier soll auch die Struktur des restlichen Netzwerks betrachtet werden.
- Wie nützlich ist das Web of Trust für seine Teilnehmer? Als Mass für die Nützlichkeit wird hier angesehen, wie viele Schlüssel für Teilnehmer anhand der Signaturen im Netzwerk prinzipiell verifizierbar sind.
- Wie robust ist das Web of Trust? Wie sehr hängt sein Zusammenhang von einzelnen Schlüsseln ab?
- Wie häufig werden verschiedene Verschlüsselungs- und Hashalgorithmen bei PGP-Schlüsseln verwendet? Welche Auswirkungen haben Fortschritte in Angriffen gegen diese Algorithmen?
- Spiegeln sich Gruppierungen von Individuen in der Struktur des Web of Trust wieder? Lässt sich anhand solcher Gruppen erklären, wie sich das Netzwerk bildet?

1.2 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist im weiteren wie folgt gegliedert: Kapitel 2 erläutert die notwendigen Grundlagen. Dies sind zum einen die Prinzipien asymmetrischer Kryptographie (Abschnitt 2.1), Methoden zur Authentifizierung öffentlicher Schlüssel, die Weiterhin werden in Abschnitt 2.2 die Prinzipien von PGP und GnuPG sowie die Rahmenbedingungen, in denen PGP/GnuPG verwendet wird, beschrieben. Außerdem werden in Abschnitt 2.3 die graphentheoretischen und netzwerkanalytischen Verfahren eingeführt, die in dieser Arbeit verwendet werden. Abschnitt 4.6 bespricht verwandte Arbeiten.

Kapitel 3 beschreibt die verwendeten Methoden. Abschnitt 3.1.1 begründet zunächst, warum die Extraktion der benötigten Daten selbst implementiert wurde. Abschnitt 3.1.2 beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit implementierte Software zur Extraktion und Analyse des Web of Trust, während Abschnitt 3.3 die Vorgehensweise für die Analyse der Community-Struktur in Abschnitt 4.3 erläutert.

Kapitel 4 stellt die Ergebnisse vor und diskutiert sie. Dies gliedert sich in Ergebnisse über die Struktur des Web of Trust (Abschnitt 4.2), einige Statistiken über Eigenschaften einzelner Schlüssel und die zeitliche Entwicklung des Web of Trust (Abschnitt 4.4) sowie die Analyse der Community-Struktur (Abschnitt 4.3).

Kapitel 5 schließlich fasst die Ergebnisse zusammen und bietet einen Ausblick auf Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten.

2. Grundlagen

Dieses Kapitel führt Grundlagen ein, die für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Dies sind zum einen die Kryptographie mit öffentlichen Schlüsseln und das sich daraus ergebende Problem der Authentifizierung öffentlicher Schlüssel. Außerdem wird auf die Funktionsweise der PGP-Software eingegangen.

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Netzwerkstruktur des Web of Trust liegt, werden die kryptographischen Grundlagen (Abschnitt 2.1) und die Funktionsweise der PGP-Software (Abschnitt 2.2) nur in dem Ausmaß besprochen, das für die weitere Arbeit nötig ist. Für detailliertere Darstellungen wird auf entsprechende Literatur verwiesen.

Abschnitt 2.3 definiert dann den grundlegenden Begriff des Graphen und einige verwandte Begriffe und führt dann die Methoden aus dem Bereich der Netzwerkanalyse ein, mit denen die Struktur des Web of Trust untersucht wird.

Zu beachten ist, dass im Kapitel 2 der Begriff „Schlüssel“ einen kryptographischen Schlüssel im Allgemeinen bezeichnet, während ab Kapitel 3 damit ausschließlich der öffentliche Teil eines OpenPGP-Schlüsselpaares gemeint ist.

2.1 Kryptographie mit öffentlichen Schlüsseln

Dieser Abschnitt erläutert zunächst die Prinzipien symmetrischer und asymmetrischer Kryptographie, geht dann auf das Problem der Schlüsselverteilung bei asymmetrischer Verschlüsselung ein und führt zu dessen Lösung die Konzepte Public Key Infrastructure (PKI), X.509 und Web of Trust (WoT) ein. Die Darstellung beruht auf [MeOV96].

2.1.1 Ziele von Kryptographie

Wir betrachten den Fall einer Nachricht, die über einen Kanal transportiert wird. Im Kontext von Computernetzwerken, insbesondere des Internets, muss im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass unberechtigte Dritte in der Lage sind, Nachrichten auf einem Kanal abzuhören, zurückzuhalten und zu verändern. Menezes et al.

[MeOV96] definieren essentielle Ziele von Informationssicherheit, die in diesem Fall relevant sind:

Vertraulichkeit Es soll sichergestellt werden, dass der Inhalt einer Nachricht nur berechtigten Kommunikationspartnern zugänglich ist.

Authentizität Eine Nachricht ist dann authentisch, wenn sie zweifelsfrei ihrem Absender zugeordnet werden kann. Authentifizierung betrifft also die Verifizierung des Ursprungs oder des Urhebers einer Nachricht. Dieses Problem betrifft nicht nur die Nachricht selbst, sondern auch Schlüsselmaterial.

Integrität Es soll sichergestellt werden, dass eine Nachricht während des Transports nicht verändert wurde, bzw. dass eine Veränderung nicht unbemerkt möglich ist.

2.1.2 Prinzip

Symmetrische Kryptographie basiert auf einem *Geheimnis* oder *Schlüssel*, der sowohl dem Absender als auch dem Empfänger bekannt ist. Der gleiche Schlüssel wird dazu benutzt, eine Nachricht zu verschlüsseln und sie zu entschlüsseln. Diese Vorgänge können von jedem durchgeführt werden, der im Besitz des Schlüssels ist. Die Teilnehmer müssen also sicherstellen, dass keine unberechtigten Dritten in den Besitz des Schlüssels gelangen können. Ein Schlüssel kann natürlich bei einem direkten Treffen ausgetauscht werden. Die Verteilung oder Vereinbarung eines Schlüssels zwischen den Kommunikationspartnern ist aber dann schwierig, wenn ein direkter Austausch beispielsweise aufgrund von geografischer Entfernung nicht möglich ist und zwischen den Kommunikationspartnern noch kein sicherer Kanal¹ existiert. Dieses Problem wird als *Schlüsselverteilungsproblem* bezeichnet [MeOV96]. Außerdem stellt sich das Problem, dass für jede Menge von Kommunikationspartnern ein unterschiedlicher Schlüssel benötigt wird. Wenn davon ausgegangen wird, dass nur jeweils zwei Kommunikationspartner miteinander kommunizieren, wächst die Anzahl der benötigten Schlüssel also quadratisch mit der Anzahl der Teilnehmer.

Eine Methode, um das Problem der Schlüsselverteilung über einen unsicheren Kanal zu lösen, bietet *asymmetrische Kryptographie* oder *Public-Key-Kryptographie*. Dabei gibt es keinen einzelnen Schlüssel, über den alle Kommunikationspartner verfügen. Stattdessen verfügt jeder Teilnehmer über ein *Schlüsselpaar*, das aus einem *privatem* und einem *öffentlichen* Schlüssel besteht. Zwischen diesen beiden Schlüsseln muss ein mathematischer Zusammenhang bestehen. Der private Schlüssel darf allerdings nicht mit akzeptablem Aufwand aus dem öffentlichen Schlüssel ableitbar sein. Das entscheidende Merkmal eines asymmetrischen Kryptographieschemas ist, dass der Schlüssel, mit dem eine Nachricht verschlüsselt wird, nicht mit dem Schlüssel identisch ist, mit dem sie wieder entschlüsselt werden kann.

Asymmetrische Kryptographie kann benutzt werden, um die in Abschnitt 2.1.1 definierten Ziele zu gewährleisten. Vertraulichkeit wird erreicht, indem der Absender einer Nachricht diese mit dem öffentlichen Schlüssel des Empfängers verschlüsselt. Diese Nachricht kann dann nur mit dem entsprechenden privaten Schlüssel des Empfängers

¹Ein sicherer Kanal bezeichnet einen Kanal, auf dem die oben definierten Eigenschaften Vertraulichkeit, Authentizität und Integrität gewährleistet sind.

entschlüsselt werden. Um Authentizität und Integrität zu gewährleisten, werden *digitale Signaturen* verwendet, die von einem Geheimnis (dem privaten Schlüssel) und der zu signierenden Nachricht abhängen. Ein digitales Signaturschema besteht aus einer Signaturverifizierungsfunktion und einer Signaturerzeugungsfunktion. Gegeben ein asymmetrisches Schlüsselpaar mit einem öffentlichen Schlüssel k und einem privaten Schlüssel k^{-1} sowie eine Nachricht m wird eine digitale Signatur d erzeugt, indem die Signaturerzeugungsfunktion auf k^{-1} und m angewandt wird. Um die Signatur d zur Nachricht m zu überprüfen, wird die Verifizierungsfunktion auf d , m und den öffentlichen Schlüssel k angewandt. Sie gibt an, ob es sich um eine gültige Signatur bezüglich des zugehörigen privaten Schlüssels k^{-1} handelt oder nicht.

Der öffentliche Schlüssel kann öffentlich beliebig verfügbar gemacht und über einen unsicheren Kanal transportiert werden. Der private Schlüssel hingegen darf nur dem Besitzer bekannt sein, da nur mit ihm die Operationen Entschlüsselung und Erstellung von digitalen Signaturen möglich sind.

Asymmetrische Kryptographie löst das oben angesprochene Skalierungsproblem, da nicht mehr ein Schlüssel für jedes Paar von Kommunikationspartnern benötigt wird, sondern nur noch ein Schlüsselpaar für jeden Teilnehmer.

2.1.3 Authentisierung von Schlüsseln

Die Verteilung von öffentlichen Schlüsseln über unsichere Kanäle scheint zwar zunächst das Schlüsselverteilungsproblem zu lösen. Öffentliche Schlüssel können über beliebige Wege verteilt werden, etwa per E-Mail, auf Webseiten oder auf Keyservern (Abschnitt 2.2.4). Allerdings tritt dann ein weiteres Problem auf: Wie kann sichergestellt werden, dass ein öffentlicher Schlüssel authentisch ist, er also tatsächlich von dem vorgeblichen Besitzer stammt und dieser das Schlüsselmaterial kontrolliert?

Sei angenommen, dass Benutzer B den öffentlichen Schlüssel von Benutzer A über einen unsicheren Kanal bezieht und dass keine Vorkehrungen getroffen werden, um die Authentizität des Schlüssels sicherzustellen. Ein aktiver Angreifer M könnte dann den echten Schlüssel von A abfangen und durch einen Schlüssel ersetzen, der zwar die Identität von A trägt, aber unter der Kontrolle von M steht. M wäre dann in der Lage, Nachrichten zu entschlüsseln, die von B mittels des vermeintlich A gehörenden Schlüssels verschlüsselt wurden. M könnte darüber hinaus solche Nachrichten mit dem echten Schlüssel von A verschlüsseln und sie weiter schicken. Auf diese Weise bliebe der Angriff unbemerkt. Ein solcher Angriff wird als *Man-in-the-middle-Angriff* bezeichnet.

Natürlich kann die Authentizität eines Schlüssels überprüft werden, wenn dieser bei einem persönlichen Treffen übergeben wird. Im Kontext elektronischer Kommunikation ist dies jedoch im Allgemeinen nicht möglich. Stattdessen müssen sich die Beteiligten dafür auf einen zuverlässigen Dritten (Trusted Third Party – TTP) verlassen, der die Authentizität der Schlüssels bestätigt. Eine TTP gibt eine Zusicherung über die Bindung von einem öffentlichen Schlüssel an eine Person oder allgemein eine Entität ab.

Diese Zusicherung hat die Form eines *Zertifikats*. Ein Zertifikat besteht aus einem Datenteil, der eine Identität (in Form eines Namens), den zugehörigen öffentlichen Schlüssel sowie eventuell zusätzliche Attribute enthält. Außerdem enthält ein Zertifikat einen Signaturteil. Dieser besteht aus einer digitalen Signatur über dem Datenteil, die

mit dem Schlüssel der TTP erstellt wurde. Die Authentizität eines Zertifikats kann also überprüft werden, indem die Signatur auf dem Zertifikat mit dem öffentlichen Schlüssel der TTP (welcher natürlich selbst authentisch sein muss) überprüft wird.

Um sich auf die Zusicherungen der TTP verlassen zu können, muss ein Benutzer dieser *vertrauen*. Vertrauen bedeutet hier die Annahme, dass die TTP stets korrekte Zusicherungen abgibt. Um eine korrekte Zusicherung in Form eines Zertifikats für einen öffentlichen Schlüssel abgeben zu können, muss die TTP überprüfen, dass der Schlüssel tatsächlich der Person gehört, deren Identität auf dem Schlüssel vermerkt ist. Außerdem muss sichergestellt werden, dass diese Person auch im Besitz des entsprechenden privaten Schlüssels ist.

Selbstverständlich kann die Authentizität des öffentlichen Schlüssels einer TTP wiederum durch ein Zertifikat sichergestellt werden. Außerdem kann ein öffentlicher Schlüssel Zertifikate für mehrere andere Schlüssel abgeben und für einen öffentlichen Schlüssel können mehrere Zertifikate existieren. Auf diese Weise ergibt sich im Allgemeinen ein *gerichteter Graph* der als *Zertifikatsgraph* bezeichnet wird.

2.1.3.1 Hierarchische Public-Key-Infrastruktur mit X.509

Infrastrukturen für die sichere Verteilung von öffentlichen Schlüsseln (Public-Key-Infrastrukturen – PKI) lassen sich dahingehend unterscheiden, welche Instanzen für das Ausstellen von Zertifikaten zuständig sind. Eine Möglichkeit besteht darin, diese Funktion exklusiv zentralen, Instanzen, so genannten *Certificate Authorities*, zuzuweisen. Diese stellen bei der Ausstellung eines Zertifikates sicher, dass der tatsächliche Besitzer des Schlüssels mit dem angegebenen Besitzer identisch ist. In einem solchen Modell sind die Teilnehmer hierarchisch angeordnet.

Ein Beispiel für ein solches Modell ist eine Public-Key-Infrastruktur nach dem X.509-Standard. In einer solchen PKI sind Certificate Authorities hierarchisch in einem Baum angeordnet. Jede CA zertifiziert diejenigen CAs, die in diesem Baum unterhalb von ihr liegen. Normale Benutzer stellen selbst keine Zertifikate aus, ihre öffentlichen Schlüssel bilden in diesem Baum also die Blätter.

Certificate Authorities müssen natürlich vertraut werden. Allerdings haben einzelne Benutzer im Kontext von X.509-PKIs üblicherweise wenig Einfluss darauf, welche CAs als vertrauenswürdig betrachtet werden. In einer Organisation kann eine Richtlinie bestimmen, welche Certificate Authorities Zertifikate ausstellen dürfen. Diese CAs sind dann implizit vertrauenswürdig. Die meisten Anwender müssen jenen Certificate Authorities vertrauen, deren Wurzelzertifikate als Teil des Webbrowsers oder des Betriebssystems ausgeliefert werden.

Im Kontext von X.509 werden Certificate Authorities meistens von staatlichen Organisationen oder Unternehmen betrieben, deren Geschäftsmodell aus der Ausstellung von Zertifikaten gegen Gebühren besteht.

2.1.4 Kryptographische Hashfunktionen

Eine grundlegende kryptographische Primitive sind *kryptographische Hashfunktionen*. Kryptographische Hashfunktionen sind unter anderem ein entscheidender Baustein für digitale Signaturschemata.

Eine Hashfunktion h ist eine Abbildung von Binärstrings beliebiger Länge auf Binärstrings einer festen Länge n . Die Ausgabe $h(x)$ eines Binärstrings x wird als *Hashwert* (oder als *Fingerabdruck*) von x bezeichnet. Übliche Kriterien für eine gute Hashfunktion sind eine annähernde Gleichverteilung der Hashwerte und eine möglichst geringe Wahrscheinlichkeit von Kollisionen. Eine Kollision tritt dann auf, wenn $h(x) = h(y)$ für zwei Eingaben x und y gilt.

Für eine kryptographische Hashfunktion werden zusätzliche Eigenschaften gefordert. Es darf nicht mit akzeptablem Berechnungsaufwand möglich sein, zwei Binärstrings x_1 und x_2 zu berechnen, so dass $h(x_1) = h(x_2)$ gilt. Diese Eigenschaft wird als *Kollisionsresistenz* bezeichnet. Außerdem muss die Funktion resistent gegen *Urbild-Angriffen* sein, d.h. es darf mit akzeptablem Aufwand nicht möglich sein, zu einem Hashwert y einen Binärstring x zu berechnen, so dass $h(x) = y$ gilt.

2.2 PGP/GnuPG

PGP ist ein Softwarepaket, das unterschiedliche kryptographische Methoden mit einem Fokus auf asymmetrischer Kryptographie zur Verschlüsselung von E-Mails implementiert. Die ursprüngliche Version von PGP wurde von Phil Zimmerman entwickelt. Der Quellcode von PGP wurde von Anfang an der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. PGP wird seit 1996 als kommerzielles Produkt vertrieben, blieb aber trotzdem kostenlos verfügbar [Wiki10]. Seit 1998 ist das verwendete Nachrichten- und Schlüsselformat durch den RFC 2440 [CDFT98] und seit 2007 durch den überarbeiteten RFC 4880 [CDFS⁺07] standardisiert. Seit 1999 existiert mit GnuPG [Gnu10] eine freie Implementierung von OpenPGP unter der GNU General Public Licence, deren Entwicklung zeitweise vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. GnuPG scheint inzwischen die am meisten verbreitete OpenPGP-Implementierung zu sein.

PGP benutzt asymmetrische Kryptographie für Verschlüsselung und digitale Signaturen und bietet damit ein Werkzeug, um Vertraulichkeit, Authentizität etc. von Nachrichten zu erreichen. Die häufigste Anwendung von PGP ist die Verschlüsselung und Signierung von E-Mail-Nachrichten. Es kann aber auch benutzt werden, um beliebige Dokumente und Dateien zu verschlüsseln und zu signieren.

Wie die meisten kryptographischen Systeme, die asymmetrische Verfahren benutzen, ist PGP/GnuPG ein hybrides System. Die asymmetrischen Schlüssel werden nur benutzt, um einen symmetrischen Sitzungsschlüssel zu verschlüsseln, mit dem wiederum der eigentliche Nachrichteninhalt verschlüsselt wird. Der Grund dafür liegt unter anderem darin, dass symmetrische Verfahren in der Regel deutlich schneller sind als asymmetrische Verfahren.

PGP und GnuPG implementieren eine Vielzahl von symmetrischen und asymmetrischen Verschlüsselungsalgorithmen sowie Hashalgorithmen. GnuPG erzeugte bis zum Jahr 2009 in der Standardeinstellung DSA/ElGamal-Schlüssel. Seit 2009 werden standardmäßig Schlüssel nach dem RSA-Verfahren erzeugt (siehe Abschnitt 4.4).

OpenPGP-Schlüssel können mit einem Ablaufdatum versehen werden. Auch einzelne Teile eines Schlüssels, etwa einzelne UserIDs oder Signaturen, können ein Ablaufdatum erhalten. Ein Schlüssel kann aus verschiedenen Gründen nicht mehr benutzbar sein: Er kann kompromittiert worden sein, das Schlüsselmaterial oder eine Passphrase

können verloren gegangen sein oder er kann schlichtweg durch einen anderen Schlüssel ersetzt worden sein. In solchen Fällen kann ein Schlüssel *widerrufen* werden, indem eine spezielle Widerrufssignatur durch den Besitzer auf dem Schlüssel angebracht wird. Ein abgelaufener oder widerrufener Schlüssel kann zwar noch benutzt werden, um Nachrichten zu entschlüsseln und Signaturen zu verifizieren. Er ist aber nicht mehr für Verschlüsselungs- und Signierungsoperationen verwendbar.

2.2.1 Web of Trust

Für die Authentifizierung von öffentlichen Schlüsseln benutzt PGP eine dezentrale Alternative zu dem in Abschnitt 2.1.3.1 beschriebenen hierarchischen und zentralen Modell [Ashl99]. Die Fähigkeit, Zertifikate auszustellen, ist dabei nicht auf Certificate Authorities beschränkt. Stattdessen ist jeder Benutzer in der Lage, Zertifikate für öffentliche Schlüssel auszustellen. Ein öffentlicher Schlüssel kann von beliebig vielen Teilnehmern zertifiziert werden. Damit ergibt sich für die Zertifikate nicht nur ein Baum, sondern tatsächlich ein allgemeiner gerichteter Zertifikatsgraph. Dieser Graph wird als *Web of Trust*² bezeichnet.

Da jeder Teilnehmer Zertifikate ausstellen kann, stellt jeder Teilnehmer potentiell eine Trusted Third Party dar. Allerdings kann natürlich nicht jedem Teilnehmer dahingehend vertraut werden, korrekte Zertifikate auszustellen. Während im Fall von X.509 das Vertrauen in die Certificate Authorities üblicherweise von vornherein festgelegt ist, muss im Fall des Web of Trust jeder Teilnehmer selbst entscheiden, welchen anderen Teilnehmern er vertraut. Er muss aufgrund von Vorwissen und Annahmen abschätzen, ob ein anderer Teilnehmer zuverlässig korrekte Zertifikate ausstellt.

Im Vergleich zu zentralen Modellen wird dem einzelnen Teilnehmern hier eine erheblich größere Verantwortung und ein deutlich größerer Aufwand zugewiesen, da er sowohl für die Überprüfung der Authentizität von Schlüsseln, für die er Zertifikate ausstellt, als auch für die Einschätzung der Zuverlässigkeit anderer Teilnehmer zuständig ist. Allerdings ergibt sich damit gleichzeitig ein erheblicher Gewinn an Flexibilität. Ein Teilnehmer ist eben nicht darauf angewiesen, sich auf zentrale Autoritäten zu verlassen. In zentralen Modellen hat er üblicherweise wenig Einfluss auf die Auswahl der als vertrauenswürdig angesehenen Certificate Authorities und er hat keine andere Wahl, als der Certificate Authority zu vertrauen, die ein bestimmtes Zertifikat ausgestellt hat. Vertraut er einer CA persönlich nicht, hat er keine direkte Möglichkeit, die von dieser zertifizierten Schlüssel zu authentifizieren. Im Web of Trust spielt es keine Rolle, ob ein öffentlicher Schlüssel von nicht vertrauenswürdigen Teilnehmern zertifiziert wurde, solange sich *ein* Zertifikatspfad mit vertrauenswürdigen Teilnehmern ergibt. Wird ein Schlüssel von mehreren als vertrauenswürdig eingeschätzten Teilnehmern zertifiziert, kann diese Zertifizierung als sicherer angesehen werden. Selbst wenn ein Angreifer einen Teilnehmer überlisten sollte, ein falsches Zertifikat auszustellen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass er dies für mehrere Teilnehmer schafft, deutlich geringer.

Der gerichtete Zertifikatsgraph stellt eine Verallgemeinerung des Zertifikatsbaums von hierarchischen und zentralen Modellen dar. Tatsächlich kann das Modell des Web

²Dieser Begriff ist irreführend, da der Zertifikatsgraph zunächst keine Informationen über Vertrauen enthält, sondern tatsächlich nur aus Zertifikaten besteht. Er wird in dieser Arbeit trotzdem benutzt, da er in der Literatur etabliert ist.

of Trust als eine Verallgemeinerung solcher Modelle angesehen werden. Es spricht zunächst nichts dagegen, mit den Mitteln des Web of Trust ein hierarchisches Modell auszudrücken und zu implementieren (siehe auch Abschnitt 2.2.5.2). Die aktuelle Version des OpenPGP-Standards sieht einen Mechanismus vor, um einen Baum von Certificate Authorities kryptographisch sicher auszudrücken (sog. *trust signatures*).

Statt vom Ausstellen eines Zertifikats wird im Kontext von PGP üblicherweise vom *Signieren eines Schlüssels* gesprochen.

Der konkrete Algorithmus, mit dem PGP/GnuPG anhand eines Zertifikatsgraphen und einer Vertrauensdatenbank die Gültigkeit eines Schlüssels entscheiden, wird in Abschnitt 2.2.3 detailliert beschrieben.

2.2.2 Struktur von OpenPGP-Paketen

An dieser Stelle wird in groben Zügen beschrieben, wie ein OpenPGP-Schlüssel aufgebaut ist. Für Details wird auf den OpenPGP-Standard [CDFS⁺07] verwiesen.

Ein OpenPGP-Schlüssel besteht aus einer Reihe von *Paketen*. Unterschiedliche Funktionen werden von unterschiedlichen Paket-Typen wahrgenommen. Ein öffentlicher OpenPGP-Schlüssel enthält zunächst ein *Public-Key-Paket*, das das eigentliche Schlüsselmaterial enthält. Weiterhin enthält ein Schlüssel eine Reihe von *UserID*-Paketen, wobei mindestens ein solches Paket vorhanden sein muss. UserID-Pakete enthalten im Wesentlichen eine UserID bestehend aus einem Namen und einer E-Mail-Adresse. Sie geben also eine Identität an. Zu jedem UserID-Paket gehört eine Reihe von *Signature*-Paketen. Diese bestehen aus einer digitalen Signatur über dem Public-Key-Paket und dem UserID-Paket. Eine Signatur auf einer UserID bindet den Schlüssel an diese Identität. Jede UserID verfügt über mindestens eine Selbstsignatur, die mit dem Schlüssel selbst erstellt wurde. Nach der obigen Definition eines Zertifikats stellt also jeder (öffentliche) OpenPGP-Schlüssel, auch wenn er keine Signaturen von Dritten enthält, ein selbst-signiertes Zertifikat dar. Werden zusätzliche Signaturen auf dem Schlüssel angebracht, ergibt sich gewissermaßen ein Zertifikat mit mehreren Signaturteilen (oder mehrere Zertifikate, die sich auf einen gemeinsamen Datenteil beziehen).

2.2.3 Das GnuPG-Vertrauensmodell

Öffentliche PGP-Schlüssel werden oft nicht in einer Weise übergeben, die die sofortige Verifikation des Schlüssels zulässt, beispielsweise bei einem persönlichen Treffen. Stattdessen werden Schlüssel häufig per E-Mail, über einen Keyserver (siehe Abschnitt 2.2.4) oder andere elektronische Wege ausgetauscht. Überprüfung der Authentizität eines Schlüssels ist deswegen von großer Bedeutung.

Das Vertrauensmodell ist der Algorithmus, mit dem PGP bzw. GnuPG entscheiden, ob ein Schlüssel anhand des Web of Trust als gültig betrachtet wird [Ashl99]. Gültig meint an dieser Stelle, dass die Zugehörigkeit des Schlüssels zu dem angeblichen Besitzer bestätigt wurde.

PGP speichert Schlüssel in einem *Schlüsselring*. Jedem Schlüssel in einem Schlüsselring wird ein *Vertrauenswert* zugewiesen. Mögliche Werte sind

- Kein Vertrauen
- geringfügiges Vertrauen
- volles Vertrauen
- ultimatives Vertrauen

Der Vertrauenswert eines Schlüssels beschreibt, wie sehr der Besitzer des Schlüsselrings dem Besitzer des Schlüssels vertraut, zuverlässig korrekte Zertifikate zu erzeugen, also die Bindung von öffentlichen Schlüsseln an Personen zu verifizieren. Zur Überprüfung der Authentizität eines Schlüssels werden von GnuPG nur Signaturen betrachtet, die von Schlüsseln erzeugt wurden, deren Besitzern mindestens *geringfügig* vertraut wird. *Ultimativ* wird ausschließlich implizit dem Besitzer des Schlüsselrings selbst vertraut. Es muss bemerkt werden, dass den einzelnen Vertrauenswerten keine festgelegte Semantik zugeordnet ist. Ihre Bedeutung ergibt sich eher anhand ihrer Auswirkungen im Algorithmus (siehe unten). Jeder Benutzer muss selbst entscheiden, anhand welcher Kriterien er welchen Personen wie stark vertraut. Diese Vertrauenswerte sind individuell. Jeder Benutzer verfügt über seine eigene, lokale Datenbank von Vertrauenswerten, die nicht mit anderen Benutzern geteilt werden³. Vertrauen ist also insbesondere nicht transitiv.

Ein Schlüssel wird von GnuPG genau dann als gültig betrachtet, wenn er die folgenden Bedingungen erfüllt:

1. Der Schlüssel wurde von ausreichend vielen *gültigen* Schlüsseln unterschrieben, d.h. er wurde mindestens entweder von
 - dem Besitzer des Schlüsselrings selbst (d.h. von einem Schlüssel mit *ultimativem Vertrauen*) unterschrieben
 - mindestens N gültigen Schlüsseln, denen voll vertraut wird, unterschrieben
 - mindestens M gültigen Schlüsseln, denen geringfügig vertraut wird, unterschrieben
2. Eine Signaturkette wird nur verwendet, wenn sie ausgehend vom Besitzer des Schlüsselrings maximal die Länge L hat.

Ein Schlüssel, der von weniger voll bzw. geringfügig vertrauenswürdigen Schlüsseln als notwendig unterschrieben wurde, wird als eingeschränkt gültig angesehen. Allerdings werden Schlüssel dieser Kategorie von GnuPG genauso wie nicht gültige Schlüssel behandelt.

³Die Rede von „dem“ Web of Trust ist insofern missverständlich. Eigentlich verfügt jeder Teilnehmer über sein persönliches Web of Trust, dass sich aus seiner persönlichen Vertrauensdatenbank und dem Netzwerk von Signaturen ergibt. Der Begriff „Web of Trust“ wird im Rest dieser Arbeit aber nur im Sinne des Zertifikatsgraphen verwendet.

GnuPG verwendet in der Standardeinstellung die Werte $N = 1$, $M = 3$ und $L = 5$. Damit wird *ein* Zertifikat, dass von einem Schlüssel mit vollem Vertrauen ausgestellt wurde, als ausreichend betrachtet. Für Schlüssel, denen nur geringfügig vertraut wird, ist ein einzelnes Zertifikat nicht ausreichend. Dieses muss noch durch 2 weitere solche Zertifikate bestätigt werden.

GnuPG erlaubt es einem Anwender, die Parameter N , M und L selbst zu setzen und damit seine persönlichen Sicherheitsanforderungen umzusetzen. Je höher beispielsweise die notwendige Anzahl von Signaturen, um so kleiner ist der Schaden, den eine einzelne fehlerhafte Signatur anrichten kann. Ist die maximale Pfadlänge auf einen kleinen Wert begrenzt, so ist auch die maximale Anzahl der Signaturen auf dem Pfad kleiner, die potentiell fehlerhaft sein können. Andererseits verringert sich damit die Anzahl der Signaturen (Pfade im Web of Trust), die für die Verifizierung benutzt werden können, und damit die Anzahl verifizierbarer Schlüssel. Es muss also eine Abwägung zwischen dem Sicherheitsbedürfnis des Nutzers und der praktischen Benutzbarkeit getroffen werden.

OpenPGP-Signaturpakete werden in Typen (auch „certification level“) unterschieden, die angeben, wie gründlich der Ersteller der Signatur die Identität des Besitzers des signierten Schlüssels verifiziert hat. Diesen Typen wird durch den OpenPGP-Standard absichtlich keine klar definierte Semantik zugeschrieben, es werden lediglich Vorschläge für deren Bedeutung gemacht. Die möglichen Typen sind

Generic Der Ersteller der Signatur macht keine Aussage darüber, wie er überprüft hat, dass der Besitzer des Schlüssels die Person ist, die durch die UserID benannt wird.

Persona Der Ersteller hat die Identität des Schlüsselhabers nicht verifiziert.

Casual Der Ersteller hat die Identität des Schlüsselhabers informell verifiziert.

Positive Der Ersteller hat die Identität des Schlüsselhabers gründlich⁴ verifiziert.

Mit den Standardeinstellungen werden Signaturen vom Typ „Generic“ erzeugt. Diese Typen werden bei der Berechnung der Gültigkeit von Schlüsseln nur insofern verwendet, als Signaturen vom Typ „Persona“ nicht beachtet werden. Die restlichen Typen werden gleich behandelt. Sie bieten aber die Möglichkeit, die Aussagekraft von Signaturen feiner zu untergliedern.

Abbildung 2.1 gibt ein Beispiel für die Berechnung der Gültigkeit von Schlüsseln unter Verwendung der Standard-Parameter $N = 1$, $M = 3$ und $L = 5$. Die Schlüssel B , H , K und I wurden direkt von A , dem Besitzer des Schlüsselrings, unterschrieben und sind deshalb voll gültig. Da L , M , und N von K unterschrieben wurden und dieser über volles Vertrauen verfügt, sind sie ebenfalls voll gültig. O ist voll gültig, da er von drei Schlüsseln mit geringfügigem Vertrauen unterschrieben wurde. J wurde dagegen nur von zwei Schlüsseln mit geringfügigem Vertrauen unterschrieben und ist deshalb nicht voll, sondern nur eingeschränkt gültig. Der Signaturpfad zu J über I wird nicht betrachtet, da I nicht vertraut wird. G wurde zwar von einem voll

⁴Es wird generell angenommen, dass mit diesem Typ eine Verifizierungsmethode wie in Abschnitt 2.2.5.1 beschrieben verbunden ist.

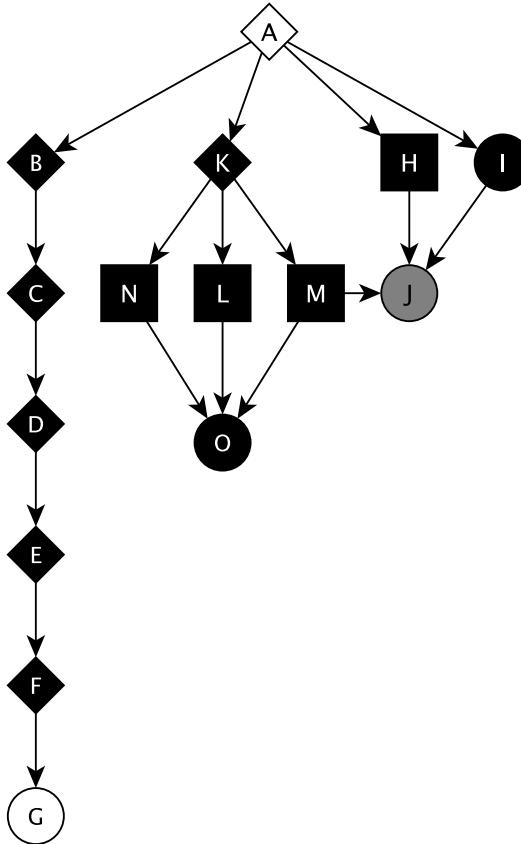


Abbildung 2.1: Beispiel für die Berechnung der Gültigkeit von Schlüsseln (Raute: volles/ultimatives Vertrauen, Quadrat: geringes Vertrauen, Kreis: kein Vertrauen, schwarz: voll gültig, grau: eingeschränkt gültig, weiß: ungültig)

gültigen Schlüssel mit vollem Vertrauen unterschrieben. Allerdings überschreitet die Signaturkette zu A die maximale Länge von 5 und wird deshalb nicht benutzt.

Ein öffentlicher Schlüssel, der anhand dieser Regeln nicht als authentisch verifiziert werden kann, kann trotzdem zur Verschlüsselung und zur Verifizierung von Signaturen verwendet werden. Allerdings warnt GnuPG in diesem Fall vor der Verwendung.

Es muss bemerkt werden, dass keine direkte Verbindung zwischen dem Vertrauenswert und dem Gültigkeitswert eines Schlüssels besteht. Ein Schlüssel, dem voll vertraut wird, kann trotzdem aufgrund von fehlenden Signaturketten ungültig sein. Signaturen dieses Schlüssels können dann nicht benutzt werden.

2.2.4 Das Keyserver-Netzwerk

Die Verbreitung von öffentlichen Schlüsseln ist auf beliebigen Wegen möglich, etwa per E-Mail oder auf Webseiten. Ein zentraler Ablageort für öffentliche Schlüssel erleichtert das Auffinden derselben aber erheblich. Im Kontext von PGP wird diese Aufgabe von *Keyservern* übernommen. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Datenbanken von OpenPGP-Schlüsseln, die nach verschiedenen Kriterien (etwa nach KeyID oder UserID) durchsucht werden können. Benutzer können ihre öffentlichen Schlüssel auf diese Keyserver laden, um sie der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

Schlüssel können von beliebigen Personen auf Keyserver geladen werden, nicht nur durch die Benutzer. Auf diesem Weg werden auch Signaturen (also Zertifikate), die durch einen Zertifizierer auf einem Schlüssel angebracht wurden, verbreitet. Der Zertifizierer lädt den veränderten Schlüssel auf einen Keyserver. Dieser fügt die neuen Signaturpakete dem bisherigen Schlüssel hinzu. Dabei werden stets nur Pakete zu Schlüsseln hinzugefügt, nicht überschrieben oder gelöscht. Auf diese Weise machen Keyserver den Zertifikatsgraphen zugänglich. Selbstverständlich können Zertifikate auch auf anderen (eventuell privaten) Wegen ausgetauscht werden.

Um Lastverteilung und Fehlertoleranz zu erreichen, existieren mehrere Keyserver. Diese sind als Netzwerk organisiert und synchronisieren ihren Datenbestand ständig untereinander. Benutzer finden also auf allen Keyservern des Netzwerks mit sehr geringer Verzögerung den gleichen Datenbestand⁵. Das öffentliche Keyserver-Netzwerk besteht derzeit (Mai 2010) aus 48 Keyservern [SKS]. Die üblicherweise verwendete Keyserver-Software wird in Abschnitt 3.1.2.1 beschrieben.

Eine wichtige Eigenschaft des Keyserver-Netzwerks ist es, dass sich Schlüssel, die einmal auf einen der dazugehörigen Keyserver abgelegt wurden, nicht mehr aus dem Netzwerk entfernen lassen. Zwar kann ein Schlüssel oder ein einzelnes OpenPGP-Paket aus der Datenbank von einzelnen Keyservern gelöscht werden. Allerdings wird er in diesem Fall durch die Synchronisierung mit anderen Keyservern des Netzwerks wieder auftauchen. Das Keyserver-Netzwerk insgesamt sieht keine Prozedur für die Entfernung von Schlüsseln vor. Das bedeutet, dass das öffentliche Keyserver-Netzwerk alle⁶ jemals dort veröffentlichten Schlüssel enthält. Dieses Verhalten stellt für Benutzer kein wirkliches Problem dar. Der korrekte Weg, um einen Schlüssel, der aus beliebigen Gründen nicht mehr benutzbar ist, unbrauchbar zu machen, ist der Widerruf des Schlüssels. Umgekehrt würde eine Möglichkeit zur Löschung von Schlüsseln einem Angreifer die Möglichkeit eröffnen, einzelne Schlüsselteile – beispielsweise Signaturpakete mit Widerrufssignaturen – zu entfernen und dadurch eigentlich widerrufene kompromittierte Schlüssel wieder gültig erscheinen zu lassen.

Der Widerruf eines Schlüssels oder einzelner Schlüsselbestandteile durch seinen Besitzer kann nur effektiv erfolgen, wenn die Information über den Widerruf an alle Personen verteilt wird, die den entsprechenden öffentlichen Schlüssel potentiell benutzen. Keyserver bieten die Möglichkeit, die Information über den Widerruf von Schlüsseln zentral und öffentlich verfügbar zu machen, indem das Widerrufszertifikat auf den Keyservern verfügbar gemacht wird. Allerdings kann dieses Vorgehen natürlich nur funktionieren, wenn Benutzer ihren Schlüsselring regelmäßig mit den Informationen eines Keyservern aktualisieren. Im Fall der Kompromittierung eines Schlüssels ist die Information aber zeitkritisch. Anwender sollten dann direkt informiert werden.

Indem ein Benutzer Signaturen auf einem Keyserver zur Verfügung stellt, macht er Informationen über seine Beziehungen für die Öffentlichkeit sichtbar. In Abschnitt 2.3.3 wird argumentiert, dass die Signaturbeziehungen einer Person ein Abbild sozialer Beziehungen von unterschiedlicher Art sind. Die rein topologische Information eines

⁵In Tests des Autoren dauerte es normalerweise weniger als 10 Sekunden, bis neue Schlüssel auf alle Keyserver des Verbundes propagierte waren.

⁶Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Schlüssel durch Softwarefehler verloren gingen. Die zahlreichen Kopien des Datenbestandes auf den einzelnen Keyservern und die ständige Synchronisation machen dies jedoch unwahrscheinlich.

sozialen Netzwerks erlaubt detaillierte Aussagen über die Rolle einzelner Personen im Netzwerk [CaSW05]. Benutzer müssen sich daher bewusst sein, dass die Benutzung öffentlicher Keyserver einen Verlust von Privatsphäre mit sich bringt und müssen dies gegenüber einem möglichen Gewinn an Sicherheit und Bequemlichkeit abwägen.

2.2.5 Zustandekommen von Signaturen im Web of Trust

Dieser Abschnitt beschreibt, wie Signaturen im Web of Trust üblicherweise zustande kommen.

2.2.5.1 Übliche Zertifizierungsprozeduren

Bis jetzt wurde nur erklärt, dass eine Signatur die Zusicherung über die Bindung eines Schlüssels an eine Person, d.h. eine Identität, darstellt. In diesem Abschnitt wird näher darauf eingegangen, wie solche Zusicherungen *üblicherweise* zustande kommen.

Bemerkt werden muss, dass der Zertifizierungsprozess im Kontext des Web of Trust nicht formal definiert ist. Weder der OpenPGP-RFC noch andere Standarddokumente machen dazu Vorschriften. Nur Certificate Authorities, die PGP verwenden, und einige wenige Privatpersonen dokumentieren ihre Verfahren zur Zertifizierung in Form von so genannten „Keypair-Policies“. Außerdem ist dem Autor dieser Arbeit keine Studie über tatsächlich verwendete Mechanismen bekannt. Deshalb wird an dieser Stelle nur anekdotische Evidenz als Eindruck von üblichen Praktiken präsentiert.

Die Person, die eine Signatur erstellt, wird im folgenden mit *Unterzeichner*, und die Person, deren Schlüssel unterschrieben wird, mit *Unterzeichneteter* bezeichnet. Um die oben erwähnte Zusicherung abgeben zu können, muss der Unterzeichner die Identität des Unterzeichneteten überprüfen und so sicherstellen, dass sie mit der auf dem Schlüssel angegebenen Identität (in Form der *User ID*) übereinstimmt. Diese Überprüfung sollte in Form eines *persönlichen* Treffens stattfinden, da sonst eine sinnvolle Identitätsüberprüfung im Allgemeinen nicht möglich ist. Der Unterzeichnetete sollte zuerst den Fingerabdruck seines Schlüssels präsentieren. Anhand dieses Fingerabdrucks kann der Unterzeichner überprüfen, dass der zu unterschreibende Schlüssel tatsächlich der des Unterzeichneteten ist. Der Unterzeichnetete sollte dann ein Dokument präsentieren, dass seine Identität belegt. Um die Verwendung von gefälschten Dokumenten zu erschweren, wird üblicherweise ein amtliches Ausweisdokument mit Lichtbild gefordert (Personalausweis, Reisepass). Der Unterzeichner kann nun anhand des Dokumentes überprüfen, dass der Unterzeichner mit der auf dem Schlüssel vermerkten Identität identisch ist. Damit kann der Unterzeichner den Schlüssel unterschreiben und die obige Zusicherung abgeben. Normalerweise werden beide Teilnehmer ihre Schlüssel gegenseitig unterschreiben, also die Rollen von Unterzeichner und Unterzeichnetem wechseln.

Dies sind die üblichen Anforderungen an einen Zertifizierungsprozess, wie sie von ernsthaften Benutzern des Web of Trust erwartet werden. Allerdings hindert einen Teilnehmer nichts daran, diese Anforderungen beliebig abzuschwächen. Er kann beispielsweise auf die Identitätsüberprüfung von Personen verzichten, die ihm persönlich bekannt sind oder im Extremfall auf jegliche Überprüfung verzichten. Allerdings ist jeder Benutzer selbst dafür verantwortlich zu entscheiden, welchen Personen er dahingehend vertraut, korrekte Zusicherungen abzugeben.

2.2.5.2 Certificate Authorities im Web of Trust

Eine Reihe von Einrichtungen agiert im Kontext des Web of Trust als *Certificate Authorities* im Sinne von Abschnitt 2.1.3.1. Diese Einrichtungen bieten als Dienstleistung die Signierung von PGP-Schlüsseln nach Überprüfung der Identität an. Der Prozess bzw. die Kriterien, nach dem diese Signaturen zustande kommen, ist dokumentiert. Dieser Prozess unterscheidet sich üblicherweise nicht von dem in Abschnitt 2.2.5.1 beschriebenen Vorgehen.

- Der Heise-Verlag betreibt seit 1997 eine Certificate Authority im Rahmen der „Krypto-Kampagne“. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, die Verbreitung von PGP zu fördern. Durch eine kostenlose Certificate Authority soll das Web of Trust gestärkt werden.

Die Zertifizierung wird auf Messen gegen Vorlage des Personalausweises angeboten. Die von dieser CA verwendeten Schlüssel haben insgesamt ca. 22.000 Signaturen erstellt.

- Die Certificate Authority CACert zertifiziert unter anderem auch OpenPGP-Schlüssel. Der von dieser CA verwendete Schlüssel hat ca. 3.400 Schlüssel signiert.
- Das Deutsche Forschungsnetzwerk (DFN) betrieb vermutlich bis zum Jahr 2009 eine Certificate Authority für PGP.

Das Konzept einer Certificate Authority steht nicht grundsätzlich im Widerspruch zu dem des Web of Trust. Eine Verifizierungsprozedur wie in Abschnitt 2.2.5.1 macht für einen Schlüssel einer Certificate Authority keinen Sinn, da er üblicherweise nicht mit einer einzelnen Person verbunden ist. Ein Benutzer muss sicherstellen, dass der CA-Schlüssel authentisch ist und entscheiden, ob er dem Betreiber dahingehend vertraut, die dokumentierte Policy zuverlässig umzusetzen. Zusätzlich muss allerdings der CA-Schlüssel signiert werden, um seine Signaturen benutzen zu können. Werden diese Signaturen auf dem CA-Schlüssel veröffentlicht, dann ergeben sich Signaturpfade, die zu diesem Schlüssel führen. Der CA-Schlüssel kann dann auch von Teilnehmern, die ihn nicht direkt unterschrieben haben, als Teil ganz normaler Signaturketten verwendet werden (sofern sie dem Betreiber der Certificate Authority vertrauen). Certificate Authorities fügen sich also problemlos in das dezentrale Web of Trust ein.

2.2.5.3 Keysigning-Parties

Das in Abschnitt 2.2.5.1 beschriebene übliche Verfahren betrifft zunächst nur zwei Personen. Wenn mehrere Personen zusammenkommen, um ihre Schlüssel gegenseitig zu unterschreiben, wird von einer *Keysigning-Party* (KSP) gesprochen. Die Bandbreite dieser Veranstaltungen ist sehr groß. Sie reicht von informellen Zusammenkünften mehrerer Personen, die paarweise ihre Schlüssel unterschreiben, bis hin zu größeren, formalisierten Veranstaltungen im Kontext von Konferenzen und Messen. Für größere Veranstaltungen hat sich eine Reihe von „Protokollen“ etabliert, um den Ablauf effizient zu organisieren[Bren08].

Grössere Keysigning-Parties im Open-Source-Umfeld fanden im Jahr 2009 beispielsweise auf diesen Veranstaltungen statt:

- Debconf (Konferenz des Debian-Projekts) mit 113 Teilnehmern
- FOSDEM (Open-Source-Konferenz) mit 253 Teilnehmern
- LinuxTag (Messe) mit 132 Teilnehmern

Offensichtlich ist die Obergrenze der Signaturen, die aus einer Keysigning-Party mit n Teilnehmern entstehen können, n^2 . Schon bei Veranstaltungen mit wenigen hundert Teilnehmern werden also erhebliche Mengen von Signaturen dem Web of Trust hinzugefügt.

Insbesondere auf kleinen und spontanen Veranstaltungen ist es jedem Teilnehmer überlassen, mit welchen anderen Teilnehmern er Signaturen austauscht. Üblich ist allerdings, dass (fast) alle Paare von Teilnehmern Signaturen austauschen. Ein hervorstechendes Merkmal vieler Keysigning-Parties ist also eine (fast) vollständige Vernetzung ihrer Teilnehmer.

2.2.5.4 PGP im Debian-Projekt

In einer Reihe von Open-Source-Projekten spielen PGP und das Web of Trust eine wichtige Rolle. Im Debian-Projekt beispielsweise werden PGP-Schlüssel unter anderem benutzt, um alle bereitgestellten Softwarepakete durch den zuständigen Entwickler signieren zu lassen. Auf diese Weise wird überprüft, dass ein hochgeladenes Paket tatsächlich von dem verantwortlichen Projektmitglied stammt und nicht verändert wurde. Dazu muss jeder der etwa 1000 Debian-Entwickler über einen Schlüssel verfügen, der von mindestens einem anderen Debian-Entwickler verifiziert und unterschrieben wurde. Auf diese Weise bildet sich bereits innerhalb des Projekts ein Web of Trust, das einen Teil des globalen Web of Trust darstellt. PGP scheint eine wichtige Rolle in der Kultur des Projekts zu spielen. Darauf weist beispielsweise hin, dass auf Treffen von Projektmitgliedern oft Keysigning-Parties abgehalten werden, um das Web of Trust zu stärken. Außerdem signiert eine überdurchschnittliche Anzahl von Debian-Entwicklern ihre E-Mails auf projektinternen Mailinglisten.

2.3 Graphentheorie und Netzwerkanalyse

Dieser Abschnitt erklärt für die weitere Arbeit benötigte Grundlagen aus Graphentheorie und Netzwerkanalyse.

2.3.1 Graphentheorie allgemein

Dieser Abschnitt führt einige grundlegende graphentheoretische Begriffe ein. Er richtet sich nach den Beschreibungen in [BrEr04].

Ein *Netzwerk* bezeichnet eine Ansammlung von Objekten, zwischen denen bilaterale Beziehungen bestehen. Das hier betrachtete Netzwerk besteht aus einer Ansammlung von OpenPGP-Schlüsseln, zwischen denen Beziehungen in Form von Signaturen bestehen. Ein Netzwerk kann durch einen Graphen repräsentiert werden.

Ein *Graph* $G = (V, E)$ besteht aus einer endlichen Menge V von *Knoten* und einer endlichen Menge E von *Kanten*, die je zwei Knoten miteinander verbinden. Die Anzahl $|V|$ der Knoten wird mit n und die Anzahl der Kanten mit m bezeichnet. Zwei durch eine Kante verbundene, *benachbarte* Knoten heißen *adjazent*. In einem *ungerichteten* Graphen ist E eine Teilmenge von $V \times V$, also eine Menge von Kanten $\{u, v\}$, die zwei Knoten $u \in V$ und $v \in V$ verbinden. In einem *gerichteten* Graphen besteht eine Kante aus einem geordneten Paar (u, v) von Knoten. Eine gerichtete Kante (u, v) führt vom *Ursprung* u zum *Ziel* v .

Auf Kanten kann eine Funktion $w : E \rightarrow \mathbb{N}$ definiert sein, die jeder Kante ein *Gewicht* zuordnet. Ein solcher Graph heißt dann *gewichtet*.

Ein Graph ist *vollständig*, wenn er alle möglichen Kanten enthält.

Der *Grad* $d(v)$ eines Knotens v in einem ungerichteten Graphen bezeichnet die Anzahl der Kanten, die diesen Knoten enthalten. Die *Nachbarschaft* $N(v)$ bezeichnet die Menge der Knoten, die zu v adjazent sind. In einem gerichteten Graphen bezeichnet der *eingehende Grad* $d^-(v)$ die Anzahl der Kanten, die den Knoten v als Ziel enthalten, und der *ausgehende Grad* $d^+(v)$ die Anzahl der Kanten, die v als Ursprung enthalten.

Ein *Kantenzug* zwischen Knoten v_0 und v_k in einem Graphen $G = (V, E)$ ist eine alternierende Folge $(v_0, e_1, v_1, e_2, \dots, v_{k-1}, e_k, v_k)$, wobei $v_i \in V$, $e_i \in E$, sowie $e_i = \{v_{i-1}, v_i\}$ in einem ungerichteten Graphen bzw. $e_i = (v_{i-1}, v_i)$ in einem gerichteten Graphen. Der Kantenzug hat die *Länge* i . Ein Kantenzug heißt *einfach*, wenn $e_i \neq e_j$ für $i \neq j$ gilt. Ein einfacher Kantenzug heißt *Pfad*, wenn v_0, \dots, v_k paarweise verschieden sind. Die *Distanz* $d(u, v)$ von einem Knoten u zu einem Knoten v ist die Länge eines kürzesten Pfades zwischen u und v . Besteht kein Pfad von u nach v , so wird $d(u, v) = \infty$ definiert.

Ein Graph $G' = (V', E')$ ist ein *Teilgraph* eines Graphen $G = (V, E)$, wenn $E' \subseteq E$ und $V' \subseteq V$ gelten. Ein Teilgraph $G' = (V', E')$ eines Graphen G ist durch eine Knotenmenge V' *induziert*, wenn $E' = \{(u, v) : u \in V, v \in V, (u, v) \in E\}$ gilt.

Eine *Partitionierung* oder *Zerlegung* eines Graphen bezeichnet Mengen (auch: *Cluster*) V_1, \dots, V_n mit $V_i \cap V_j = \emptyset \quad \forall 1 \leq i, j \leq n$ und $V_1 \cup \dots \cup V_n = V$. Kanten (u, v) , $u \in C_k, v \in C_l$, die innerhalb einer solchen Menge verlaufen, heißen *Intraclusterkanten*. Kanten (u, v) , $u \in C_k, v \in C_l, k \neq l$, die zwischen solchen Mengen verlaufen, heißen *Interclusterkanten*.

Ein ungerichteter Graph heißt *zusammenhängend*, wenn es zwischen allen Knotenpaaren u, v einen Pfad gibt. Eine *Zusammenhangskomponente* eines Graphen G ist ein *maximaler*, zusammenhängender induzierter Teilgraph von G . Ein gerichteter Graph ist *stark zusammenhängend*, wenn es für jeden Knoten einen gerichteten Pfad zu jedem anderen Knoten gibt. Eine *starke Zusammenhangskomponente* eines Graphen G ist dann ein maximaler, stark zusammenhängender induzierter Teilgraph von G .

2.3.2 Netzwerkstatistiken

In diesem Abschnitt werden einige Kennzahlen nach [BrSc04] definiert, die die Struktur eines Graphen charakterisieren.

Die Distanz zwischen zwei Knoten wurde bereits im vorherigen Abschnitt definiert. Ausgehend davon können die Distanzen *eines Knotens* durch die durchschnittliche Distanz dieses Knotens zu allen anderen Knoten charakterisiert werden:

$$\bar{d}(u) = \frac{1}{n-1} \sum_{v \neq u} d(u, v) \quad (2.1)$$

Für einen gesamten Graphen gibt die *charakteristische oder durchschnittliche Distanz* den Durchschnitt aller Distanzen in diesem Graphen an:

$$\bar{d} = \frac{1}{n^2 - n} \sum_{u \neq v \in V} d(u, v) \quad (2.2)$$

Die *Eccentricity* eines Knotens u ist definiert als die maximale Distanz zu einem anderen Knoten, also

$$\epsilon(u) = \max\{d(u, v) | v \in V\} \quad (2.3)$$

Davon ausgehend wird der *Durchmesser* eines Graphen als Maximum und der Radius als Minimum über die Eccentricity aller Knoten definiert. Durchmesser und Radius geben also die Ober- bzw. Untergrenze der Pfadlänge an, mit der ein Knoten alle anderen Knoten erreichen kann. Bemerkt werden muss, dass alle auf Distanzen basierenden Kennzahlen im Falle eines nicht (stark) zusammenhängenden Graphen unendlich sind. Dieses Problem wird im weiteren vermieden, indem diese Kennzahlen nur für (starke) Zusammenhangskomponenten berechnet werden.

Als Verallgemeinerung der Nachbarschaft eines Knotens wird die *h -Nachbarschaft* eines Knotens als

$$N_h(v) = \{u \in V | d(v, u) \leq h\} \quad (2.4)$$

definiert, d.h. die Menge der Knoten, zu denen die Distanz von v aus höchstens h beträgt.

Der *Clustering-Koeffizient* nach Watts und Strogatz ist ein Maß dafür, wie *transitiv* die Beziehungen in einem Netzwerk sind. Ein hoher Clustering-Koeffizient steht für eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass zwei Nachbarn v und w eines Knotens u auch untereinander verbunden sind. Sei $G = (V, E)$ ein ungerichteter Graph. Ein Dreieck $\Delta = \{V_\Delta, E_\Delta\}$ ist ein vollständiger Teilgraph der Größe 3 von G . Die Anzahl der Dreiecke *eines Knotens* wird mit $\lambda(v) = |\{\Delta : v \in V_\Delta\}|$ bezeichnet. Ein *Tripel* an einem Knoten v ist ein Teilgraph von G bestehend aus 2 Kanten sowie v und 2 weiteren Knoten, so dass beide Kanten v enthalten. Die Anzahl der Tripel eines Knotens v kann durch den Grad $d(v)$ ausgedrückt werden als $\tau(v) = \binom{d(v)}{2}$. Der *lokale* Clustering-Koeffizient c_v eines Knotens wird dann als

$$c(v) = \frac{\lambda(v)}{\tau(v)} \quad (2.5)$$

definiert. $c(v)$ gibt also an, wie viele der möglichen Dreiecke an v auch tatsächlich Dreiecke sind. Der globale Clustering-Koeffizient von G ist dann

$$C(G) = \frac{1}{|V'|} \sum_{v \in V'} c(v) \quad (2.6)$$

wobei $V' = \{v \in V : d(v) \geq 2\}$ gesetzt wird, um nicht definierte Werte für $\tau(v)$ zu vermeiden.

Pastor-Satorras et al. definieren ein Maß für die Korrelation der Knotengrade in einem Netzwerk [PSVV01]. Der Wert

$$\langle knn \rangle = \sum_{k'} k' P_c(k'|k) \quad (2.7)$$

gibt den durchschnittlichen Grad der Nachbarn von Knoten mit Grad k an. Dabei gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit $P_c(k'|k)$ die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Kante, die an einem Knoten mit Grad k beginnt, an einem Knoten mit k' endet.

Ein verwandtes Maß wird von Newman eingeführt: Ein Netzwerk zeigt *assortative mixing*, wenn Knoten mit hohem Grad hauptsächlich mit solchen Knoten verbunden sind, die ebenfalls einen hohen Grad haben [Newm02]. Diese Eigenschaft wird durch den *Assortativity-Koeffizienten* (ebd.) gemessen, dessen Werte zwischen -1 und 1 liegen. Positive Werte für ein Netzwerk zeigen assortative mixing an, bei negativen Werten zeigt das Netzwerk kein assortative mixing. Newman gibt an, dass assortative mixing eine Eigenschaft ist, die viele soziale Netzwerke von anderen Netzwerken – etwa technischer oder biologischer Natur unterscheidet. Die meisten sozialen Netzwerke zeigen assortative mixing, während die restlichen dies nicht tun.

2.3.3 Soziale Netzwerke

Ein *soziales Netzwerk* ist nach [Newm03] eine Menge von Personen bzw. Gruppen von Personen, zwischen denen Beziehungen bzw. Kontakte bestehen. Die Art dieser Interaktionen ist dabei beliebig: Beispiele für soziale Netzwerke, die in der Literatur analysiert wurden, sind unter anderem Freundschaftsnetzwerke von Schulkindern, Netzwerke von sexuellen Kontakten und Netzwerke von Geschäftsbeziehungen (ebd.).

Die im Web of Trust vorhandenen Schlüssel können als Repräsentationen der Besitzer dieser Schlüssel aufgefasst werden. Allerdings ist dies keine Eins-zu-eins-Beziehung, da eine Person über beliebig viele Schlüssel verfügen kann. Die Beziehung dieser Personen im Web of Trust repräsentiert zunächst nur eine Signatur, also eine Zusicherung über die Bindung zwischen dem signierten Schlüssel und der Identität des Besitzers. Es scheint allerdings recht unwahrscheinlich, dass solche Signaturen zwischen Personen entstehen, die sich völlig unbekannt sind und in keiner Beziehung zueinander stehen. Stattdessen wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass sich Signaturen in den meisten Fällen anhand von bereits bestehenden sozialen Kontakten zwischen den Besitzern der Schlüssel ergeben [CaBH02]. Das Spektrum möglicher Beziehungen ist dabei natürlich sehr weit und umfasst mindestens alle Gruppen von Personen, die potentiell ein Interesse an vertraulicher und authentifizierter E-Mail-Kommunikation haben: Es kann sich dabei um persönliche Bekanntschaften handeln, also etwa um Freunde und Bekannte. Genauso kann sich die Beziehung auch primär durch die Mitgliedschaft in einer gemeinsamen Gruppe oder Institution ergeben. Denkbar sind hier zum Beispiel Beziehungen, die sich aus Arbeitsverhältnissen oder einer Ausbildung ergeben, also Unternehmen oder akademische Einrichtungen. Genauso gut kann es sich aber um die Mitgliedschaft in einem Open-Source-Projekt, einem Verein oder einer politischen Organisation handeln. Auch Zusammenhänge, die nicht über eine formale Mitgliedschaft in einer festen Gruppierung entstehen, sind möglich.

Zumindest im Fall von größeren, formalen Keysigning-Parties scheint zunächst nicht notwendigerweise eine Verbindung zwischen den Teilnehmern (abgesehen von der Teilnahme selbst) zu bestehen. Es ist aber auch der Kontext relevant, in dem die Keysigning-Party stattfindet. Bei einer Konferenz oder Messe kann es sich um ein Ereignis mit einer klar definierten Zielgruppe handeln, die wiederum einer Gruppe zuordenbar ist (z.B. im Fall der „Debconf“-Konferenzen). Ist dies nicht möglich, so handelt es sich immerhin um eine Gruppe von Personen, die über ein gemeinsames Interessengebiet verfügen (beispielsweise im Fall der „LinuxTag“-Keysigning-Parties).

2.3.4 Small-World-Effekt

In sozialen Netzwerken tritt fast immer das Phänomen auf, dass die Distanzen zwischen den meisten Knotenpaaren in Relation zur Größe des Netzwerks sehr gering sind [Newm03]. Dieser Effekt wird als Small-World-Effekt bezeichnet. Der Begriff geht auf ein Experiment von Milgram zurück, bei dem Briefe von Person zu Person⁷ weitergegeben wurden, um sie von zufällig ausgewählten Absendern zu ebenfalls zufällig ausgewählten, geographisch weit entfernten Empfängern zu transportieren[TrMi69]. Diese Briefe erreichten ihr Ziel im Durchschnitt über nur sechs Zwischenstationen⁸. Mit diesem Experiment wurde gezeigt, dass Paare von Akteuren in einem sozialen Netzwerk nur durch wenige „Zwischenschritte“ miteinander verbunden sind. Eine präzisere Formulierung ist, dass die durchschnittliche Distanz nur logarithmisch mit der Anzahl der Knoten wächst.

Auch zufällige Graphen nach dem $G_{n,p}$ -Modell verfügen über eine geringe durchschnittliche Distanz [BaSt04]. Strogatz und Watts bemerken, dass viele reale Netzwerke zusätzlich über ausgeprägtes Clustering verfügen, also über einen hohen Clustering-Koeffizienten [WaSt98].

2.3.5 Skalenfreie Netzwerke

Eine Verteilung p folgt einem *power law*, wenn sie die Form

$$p(k) = ck^{-\delta} \quad \delta > 0, c > 0 \tag{2.8}$$

hat [BaSt04]. Damit kommen kleine Werte häufig vor, während sehr große Werte nur sehr selten vorkommen. Ein zentrales Merkmal solcher Verteilungen ist eine hohe *Variabilität*. Damit ist gemeint, dass die Abweichungen vom Durchschnittswert sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden können, so dass der Durchschnitt nicht besonders aussagekräftig ist.

Ein Netzwerk, in dem die Verteilung der Knotengrade zumindest asymptotisch einem power law folgt, wird als *skalenfrei* bezeichnet. Dieser Begriff geht auf Barabasi und Albert zurück, die feststellten, dass eine Reihe von Netzwerken aus verschiedenen Bereichen – etwa technologische, soziale oder biologische Netzwerke – diese Eigenschaft aufweisen [BaAl99].

Skalenfreien Netzwerken wird eine Reihe von allgemeinen Eigenschaften zugeschrieben. Die wichtigste Eigenschaft ist, dass skalenfreie Netzwerke sehr gut verbundene *Hubs*,

⁷Teilnehmer wurden aufgefordert, die Briefe an ihnen direkt bekannte Personen weiterzugeben, von denen sie annahmen, dass sie sich „näher“ am Ziel befinden würden.

⁸71% der Briefe erreichten ihr Ziel nicht.

also Knoten mit sehr hohem Grad, enthalten. Diese halten das Netzwerk zusammen und sorgen dafür, dass das Netzwerk bei der gezielten Entfernung dieser Hubs sehr schnell zusammenbricht. Auf der anderen Seite sollen sich skalenfreie Netzwerke sehr robust gegenüber der zufälligen Entfernung von Knoten zeigen, da die Chance, dabei einen Knoten mit niedrigem Grad zu treffen, hoch ist [AlJB00].

2.3.6 Communities

Dieser Abschnitt führt den Begriff der *Community* ein, definiert das Gütemass *Modularity* und beschreibt einige Algorithmen zur Erkennung von Communities in Netzwerken. Sofern nicht anders angegeben, wurde als Quelle ein Übersichtsartikel von Fortunato [Fort10] benutzt.

2.3.6.1 Grundlegende Begriffe

In vielen – insbesondere sozialen – Netzwerken neigen die Teilnehmer dazu, *Gruppen* zu bilden. In sozialen Netzwerken bilden sich etwa Gruppen von Teilnehmern, die über familiäre, freundschaftliche oder professionelle Beziehungen miteinander verbunden sind. Ein besonders intensiv untersuchter Typ solcher Netzwerke entsteht aus Kooperations- oder Koautornetzwerken von Wissenschaftlern, in denen sich Wissenschaftler nach ihren Fachgebieten gruppieren. Andere Beispiele von Netzwerken, in denen Gruppenbildung stattfindet, sind Netzwerke aus der Biologie, beispielsweise Netzwerke von Protein-Protein-Interaktionen, in denen sich funktionell ähnliche Proteine gruppieren, die an den gleichen biologischen Prozessen teilnehmen. Das hier zentrale Merkmal dieser Gruppen oder *Communities* ist die Tatsache, dass Mitglieder einer Gruppe normalerweise deutlich mehr Beziehungen zu anderen Mitgliedern dieser Gruppe haben als zu Teilnehmern außerhalb. Eine solche Community sollte sich also auch in der Struktur des Graphen wiederfinden, der das Netzwerk beschreibt. In der Tat teilen viele – insbesondere die oben angeführten – Beispiele von Netzwerken die Eigenschaft, dass die Kanten des Netzwerks nicht gleichmäßig verteilt sind. Stattdessen finden sich Gruppen von Knoten, in denen eine hohe Dichte von Kanten herrscht, während zwischen diesen Gruppen nur wenige Kanten bestehen.

In der Literatur scheint keine strenge Definition einer Community zu existieren, die allgemein akzeptiert ist. Stattdessen wird ein intuitives Verständnis verwendet, nach dem Communities *dichte* Teilbereiche eines Graphen sind, also Gruppen von Knoten, die untereinander „viele“ Kanten haben, während zu nicht in der Gruppe liegenden Knoten nur „wenige“ Kanten bestehen. Oft wird werden Communities auch algorithmisch definiert: Communities sind gerade das Ergebnis eines Algorithmus zur Community-Zerlegung.

Da ein Graph über ein konkretes Netzwerk abstrahiert und nur noch die Struktur abbildet, werden auch bei der Community-Erkennung nur Informationen benutzt, die in der Topologie des Graphen kodiert sind.

2.3.6.2 Algorithmus von Girvan/Newman

An dieser Stelle wird der Algorithmus von Girvan und Newman[NeGi04] zur Berechnung einer Community-Zerlegung beschrieben, da er den Startpunkt des großen Interesses in Community-Algorithmen in den letzten Jahren darstellt.

Edge betweeness ist ein auf Kanten definiertes Zentralitätsmaß, das auf dem Zentralitätsmaß *Vertex betweeness* [KLPR⁺04] basiert. Die edge betweeness einer Kante gibt an, wie hoch der Anteil kürzester Pfade ist, die diese Kante enthalten, wie wichtig also diese Kante für den Zusammenhalt und die Distanzen im Netzwerk ist.

Der Algorithmus von Girvan und Newman basiert auf der folgenden Idee: Wenn Knoten in Communities organisiert sind, dann gibt es nur vergleichsweise wenige Kanten, die *zwischen* Communities verlaufen. über diese Kanten müssen alle kürzesten Pfade zwischen Knoten laufen, die in unterschiedlichen Communities liegen. Diese Kanten sollten also einen hohen betweeness-Wert haben. Eine Zerlegung in Communities kann dann berechnet werden, indem diejenigen Kanten entfernt werden, die Communities verbinden, also solche mit hoher edge betweeness.

Der Algorithmus führt iterativ die folgenden Schritte aus:

1. Berechne edge betweeness für alle vorhandenen Kanten.
2. Entferne die Kante mit dem höchsten betweeness-Wert.
3. Kehre zurück zu Schritt 1, solange Kanten vorhanden sind.

Werden genug Kanten entfernt, zerfällt ein Graph in Komponenten, die *mögliche* Communities darstellen. Da jede Komponente selbst wieder unterteilt wird, ergibt sich so eine Hierarchie von Komponenten, die als Baum (ein so genanntes *Dendrogramm*) dargestellt werden können. Ein horizontaler Schnitt durch diesen Baum auf einer beliebigen Ebene liefert eine Zerlegung des Graphen.

Die Komplexität des Algorithmus beträgt $\mathcal{O}(m^2n)$ für einen Graphen mit n Knoten und m Kanten. Er ist also für grössere Graphen nicht geeignet.

2.3.6.3 Modularity

Eine solche hierarchische Zerlegung macht noch keine Aussage darüber, wie „gut“ die Zerlegung auf einer bestimmten Ebene die tatsächliche Community-Struktur wiedergibt. Um diese Frage zu beantworten, wurde ebenfalls von Girvan und Newman als Maß für die Qualität einer Zerlegung die so genannte *Modularity* definiert [NeGi04]. Gegeben einen ungerichteten Graphen $G = (V, E)$ und eine Zerlegung dieses Graphen $\mathcal{C} = C_1, \dots, C_n$ wird die Modularity Q definiert als

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{u,v \in V} \left(A_{uv} - \frac{d(u)d(v)}{2m} \right) \delta(C_u, C_v) \quad (2.9)$$

Dabei ist A die Adjazenzmatrix von G . C_u gibt die Community an, in der sich der Knoten u befindet. Das Kronecker-Delta δ ist 1 wenn $C_u = C_v$ gilt, ansonsten 0.

Wenn der Term $\frac{d(u)d(v)}{2m}$ ignoriert wird, läuft die Summe über alle Kanten, deren Endpunkte sich in der selben Community befinden. Der gesamte Term gibt dann den Anteil der Kanten an, die innerhalb einer Community verlaufen (Intraclusterkanten). Ist dieser Anteil groß, so gibt die Zerlegung die Community-Struktur des Graphen gut wieder. Allerdings wird das Maximum $Q = 1$ im trivialen Fall $C_1 = V$ erreicht. Aus diesem Grund wird die Anzahl der Kanten in Communities zusätzlich mit einem

Nullmodell verglichen. Es wird davon ausgegangen, dass ein zufälliger Graph keine ausgeprägte Community-Struktur hat. Als Nullmodell wird ein Graph gewählt, bei dem die Enden der Kanten zufällig gewählt wurden, allerdings so, dass die Grade der einzelnen Knoten die gleichen wie in G sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem solchen Graph eine Kante zwischen Knoten u und v besteht, ist gerade $\frac{d(u)d(v)}{2m}$. Q wird also dann groß, wenn die *tatsächliche* Anzahl der Intraclusterkanten höher ist als die *erwartete*.

Brandes et al. haben gezeigt, dass das Problem der Berechnung des Maximums von Q für einen gegebenen Graphen NP-vollständig ist [BDGG⁺08]. Eine direkte Berechnung einer Zerlegung eines Graphen mit maximaler Modularity ist also vermutlich nicht praktikabel.

Verschiedene Autoren haben Erweiterungen der Modularity-Definition auf andere Graphen- und Zerlegungstypen vorgeschlagen: etwa für überlappende Communities [NMCM09] und für gerichtete Graphen [LeNe08].

2.3.6.4 Weitere Algorithmen

Seit der Arbeit von Girvan und Newman wurde eine Vielzahl weiterer Methoden zur Erkennung von Communities vorgestellt. An dieser Stelle werden 2 Methoden näher beschrieben, die in dieser Arbeit verwendet werden. Einen Gesamtüberblick bietet ein Übersichtsartikel von Fortunato [Fort10].

Algorithmus von Blondel et al.

Blondel et al.[BGLL08] stellen einen Algorithmus vor, der auf *gierige* Art die Modularity optimiert. Als Bewertungsfunktion dient dabei ebenfalls Modularity. Der Algorithmus funktioniert auf gewichteten Graphen. Dafür wird eine angepasste Definition der Modularity für gewichtete Graphen verwendet [Newm04].

Der Algorithmus verläuft in Phasen, die in 2 Schritte aufgeteilt sind. Im Anfangszustand wird jedem Knoten eine eigene Community zugewiesen. In jeder Phase wird dann im ersten Schritt in einem sequentiellen Durchlauf jeder Knoten der Community desjenigen Nachbarn zugewiesen, für den sich der maximale Zugewinn an Modularity ergibt. Im zweiten Schritt wird jede der so erhaltenen Communities zu einem neuen *Superknoten* verschmolzen. Zwischen zwei Superknoten gibt es genau dann eine Kante, wenn zwischen zwei ursprünglichen Knoten in den entsprechenden Communities eine Kante verläuft. Das *Gewicht* dieser *Superkante* ist die Summe der Gewichte der ursprünglichen Kanten. Die nächste Phase besteht aus der Anwendung derselben zwei Schritte auf den erhaltenen *Supergraphen*. Durch die Phasen ergibt sich wieder eine Hierarchie in Form eines Baumes. Im Unterschied zum Algorithmus von Girvan und Newman ist dieser Algorithmus allerdings nicht *zerteilend*, sondern *verschmelzend*, so dass der Baum von unten aufgebaut wird.

Der Algorithmus hat eine Komplexität von $O(m)$ und ist damit auch für sehr große Graphen geeignet.

COPRA

Ein gänzlich anderer Ansatz, der nicht direkt mit der Optimierung des Modularity-Wertes arbeitet, wird von COPRA [Greg10] verwendet. COPRA basiert auf einem

Algorithmus von Raghavan et al. [RaAK07], der auf der Propagierung von *Labels* beruht.

Im Anfangszustand wird jedem Knoten ein unterschiedliches Label zugewiesen. In jeder Iteration wird dann ein sequentieller Lauf in zufälliger Reihenfolge über alle Knoten durchgeführt. Dabei übernimmt jeder Knoten das Label, das die Mehrheit seiner Nachbarn besitzt. Wenn dabei ein Gleichstand auftritt, wird eines der Labels zufällig ausgewählt. Auf diese Weise werden Labels über den Graphen propagiert. Einige Labels verschwinden, während andere sich ausbreiten. Da zwischen Communities nur wenige Kanten bestehen sollten, ist die Chance, dass sich Labels über Community-Grenzen ausbreiten, sehr gering. *Innerhalb* von dicht vernetzten Gruppen sollte sich jedoch ein „Konsens“ über ein Label ergeben. Das Konvergenzkriterium besteht darin, dass jeder Knoten ein Label hat, das von der Mehrheit seiner Nachbarn geteilt wird. Die Zeitkomplexität des Algorithmus wird durch die Autoren als „annähernd linear“ angegeben. Er ist also auch für große Graphen geeignet. Zu beachten ist, dass der Algorithmus durch die zufällige Reihenfolge, in der die Knoten durchlaufen werden, und die Auflösung von Pattsituationen *nicht-deterministisch* ist.

Der Algorithmus von Raghavan et al. liefert eine Zerlegung mit disjunkten Teilmengen von V . COPRA verallgemeinert diesen Ansatz zur Berechnung *überlappender* Communities. Dabei kann ein Knoten in mehreren Communities enthalten sein, die Teilmengen der Zerlegung sind nicht mehr disjunkt. Statt einfacher Labels werden Paare (c, b) von Labels c und einem Zugehörigkeitskoeffizienten b propagiert. b drückt aus, wie stark ein Knoten zur Community c gehört. In jedem Schritt übernimmt ein Knoten statt eines einzigen Labels *alle* Label seiner Nachbarn. Der Zugehörigkeitskoeffizient eines Knotens u zu Label c in der Iteration t ist definiert als

$$b_t(c, u) = \frac{1}{d(u)} \sum_{v \in N(u)} b_{t-1}(c, v) \quad (2.10)$$

also der Durchschnitt der Zugehörigkeitskoeffizienten aller Nachbarn für das Label c in der vorherigen Iteration. Die Summe der Zugehörigkeitskoeffizienten für alle Label eines Knotens beträgt 1. Um zu vermeiden, dass sich alle Labels ausbreiten, werden Paare (c, b) gelöscht, wenn b unter einem Schwellwert $\frac{1}{v}$ liegt. v gibt damit an, in wie vielen Communities ein Knoten maximal Mitglied sein kann.

Die Zeitkomplexität von COPRA wird mit $\mathcal{O}(v^3n)$ angegeben, ist also im wesentlichen linear.

3. Methoden und Materialien

3.1 Software

3.1.1 Warum eigene Software?

Das bereits in Abschnitt 4.6 erwähnte *wotsap*-Projekt stellt einen täglich aktualisierten Datensatz zur Verfügung, der die Struktur des Web of Trust beinhaltet. In diesem Abschnitt wird begründet, warum für die vorliegende Arbeit nicht auf diese Daten zurückgegriffen wurde, sondern die Datenextraktion selbst vorgenommen wurde.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die Struktur des Web of Trust abseits der größten starken Zusammenhangskomponente zu untersuchen. *wotsap* berechnet allerdings nur die Struktur eben dieser Zusammenhangskomponente. Schlüssel, die nicht in dieser Komponente enthalten sind, werden nicht beachtet. *wotsap* beginnt bei mehreren sehr gut vernetzten Schlüsseln, die sicher in der größten starken Zusammenhangskomponente (MSCC) liegen. Von diesen ausgehend werden die Signaturen in der Art einer Breitensuche (rückwärts) verfolgt. Aufgrund dieser Methode scheint es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, die Extraktion auf alle Schlüssel auszudehnen.

Der Verwendungszweck der *wotsap*-Daten ist ausschließlich die strukturelle Analyse des Netzes. Die über die reine Struktur hinausgehenden Daten, die über Schlüssel und Signaturen gespeichert werden, sind dabei auf ein Minimum reduziert: Für Schlüssel werden ausschließlich die KeyID und die primäre UserID gespeichert, für Signaturen der certification level und die KeyID des signierten und des signierenden Schlüssels. Diese Reduktion erlaubt zwar eine sehr kompakte Speicherung der Daten, macht den Datensatz aber für eine Auswertung weiterer Eigenschaften von Schlüsseln und Signaturen unbrauchbar. Das verwendete Dateiformat ist außerdem recht unflexibel und lässt eine Speicherung weiterer Daten nur mit größerem Aufwand zu.

Die *wotsap*-Daten enthalten nur die zum jeweiligen Zeitpunkt gültigen Schlüssel und Signaturen. Dieser „Schnappschuss“, reicht für die strukturelle Analyse des Graphen aus. Zeitliche Entwicklungen, beispielsweise die Größe des Datenbestandes, die Verwendung bestimmter Verschlüsselungs- und Signaturalgorithmen und die Entwicklung einzelner Komponenten können damit aber nicht nachvollzogen werden.

Die *wotsap*-Methode liefert also nicht die im Rahmen dieser Arbeit benötigten Daten. Eine Anpassung der Software würde auf eine komplette Reimplementierung hinauslaufen. Außerdem beruht die Extraktion der Daten bei *wotsap* auf der veralteten und kaum mehr benutzten *PKS*-Keyserver-Implementierung (siehe Abschnitt 3.1.2.1).

Darüber hinaus ist allerdings der *wotsap*-Datensatz fehlerhaft. Diese Fehler werden sowohl durch Fehler in der Implementierung als auch durch einen fehlerhaften Datenbestand auf dem verwendeten Keyserver verursacht: Die größte starke Zusammenhangskomponente die in dieser Arbeit berechnet wurde (MSCC-1), enthält mit dem Stand vom 02.12.2009 ca. 44.900 Schlüssel, während der *wotsap*-Datensatz (MSCC-2) vom gleichen Tag nur ca. 42.130 Schlüssel enthält. Die Differenz zwischen den Datensätzen ergibt einerseits, dass ca. 1.000 Schlüssel in MSCC-1 fehlen, die in MSCC-2 vorhanden sind. Eine stichprobenartige Analyse von 20 Schlüsseln zeigt, dass diese Schlüssel überwiegend durch Signaturketten an die MSCC angebunden sind, die aufgrund von widerrufenen Schlüsseln oder Schlüsselteilen unterbrochen sind. Dabei treten unter anderem Signaturen auf komplett widerrufenen Schlüsseln und Signaturen auf widerrufenen UserIDs auf. *wotsap* benutzt GnuPG, um die OpenPGP-Pakete eines Schlüssels zu parsen. Eine Analyse des Quelltextes von *wotsap* ergab, dass der Code zum Parsen der GnuPG-Ausgabe fehlerhaft ist. Dies führt dazu, dass *wotsap* Widerruffsignaturen fälschlicherweise nicht beachtet werden und dadurch Schlüssel in der MSCC auftauchen, zu denen kein Pfad *mehr* besteht.

Auf der anderen Seite sind ca. 3.980 Schlüssel zwar in MSCC-1 vorhanden, nicht aber in MSCC-2. Um den Grund dafür zu finden, wurde für 10 zufällig ausgewählte Schlüssel aus dieser Menge eine Signaturkette (d.h. ein Pfad) zu einem Schlüssel gesucht, der sowohl in MSCC-1 als auch in MSCC-2 vorhanden ist. Ebenfalls wurde eine Kette in der anderen Richtung gesucht. Die Signaturen dieser Ketten wurden mittels GnuPG kryptographisch verifiziert, um sicherzustellen, dass sie gültig sind. Kann für beide Richtungen jeweils eine Kette erfolgreich verifiziert werden, so ist der betreffende Schlüssel per definitionem in der MSCC. Im vorliegenden Fall konnte das für alle Schlüssel der Stichprobe gezeigt werden. Der Fehler liegt also wiederum bei *wotsap*, das diese Schlüssel fälschlicherweise ausschließt. Als Ursache dafür ergab sich in allen betrachteten Fällen der fehlerhafte Bestand des Keyserver *wwwkeys.ch.pgp.net*, der von *wotsap* verwendet wird. Die Schlüssel wurden von *wotsap* nicht in die MSCC-2 übernommen, weil Teile der dazu notwendigen Signaturketten (komplette Schlüssel oder einzelne Signaturen) auf dem Keyserver nicht vorhanden sind. Besonders häufig traten dabei Schlüssel auf, deren Ablaufdatum durch eine neue Selbstsignatur verlängert wurde. Dieses Signaturpaket fehlte auf *wwwkeys.ch.pgp.net*, wodurch der betreffende Schlüssel fälschlicherweise als abgelaufen betrachtet wurde. Diese fehlenden Teile sind aber auf allen Keyservern des *SKS*-Verbundes vorhanden. Da die Ursache in allen untersuchten Fällen die gleiche war, kann angenommen werden, dass der Fehler systematisch ist und diesen Teil der Diskrepanz zwischen den Datensätzen erklärt. Als Ursache kommen eine mangelhafte Synchronisation zwischen *wwwkeys.ch.pgp.net* und dem *SKS*-Netzwerk sowie Fehler in der auf *wwwkeys.ch.pgp.net* verwendeten *PKS*-Version in Frage.

Die Natur der Fehler legt nahe, dass hauptsächlich solche Schlüssel fehlen bzw. fälschlich einbezogen wurden, die nur über eine sehr geringe Anzahl von redundanten Pfaden zur bzw. von der MSCC verfügen. Gäbe es mehr redundante Pfade, so

hätten einzelne fehlerhafte Informationen (fehlende bzw. fälschlicherweise als gültig betrachtete Schlüssel oder Signaturen) einen geringeren Einfluss.

Die Anzahl fehlender bzw. fälschlich einbezogener Schlüssel (ca. 9% fehlend, ca. 2% fälschlich einbezogen relativ zu MSCC-1) ist so groß, dass qualitative Fehler in der Graphenstruktur zu erwarten sind. Insbesondere Aussagen über die Verteilung von Knotengraden und ähnliche Aussagen anhand dieser Daten sind mit Vorsicht zu genießen. Eine Reihe von Arbeiten verwendet die *wotsap*-Daten als Beispiel für ein empirisches soziales bzw. Small-World-Netzwerk [BrSc06, HeGu09, Dell07]. Sofern die Ergebnisse dieser Arbeit auf experimentellen Resultaten aufbauen, die mit diesen Daten gewonnen wurden, sollten sie daher mit korrekten Daten überprüft werden. Der Keyserver wwwkeys.ch.pgp.net sollte von Anwendern nicht mehr benutzt werden.

3.1.2 Design und Implementierung

Dieser Abschnitt beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Software zur Extraktion und Analyse des Web of Trust. Abschnitt 3.1.2.1 beschreibt zunächst die Keyserver-Software *SKS*.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software besteht aus zwei Teilen: Der in SKS integrierte Extraktionsteil liest Schlüssel aus der Datenbank eines Keyservers aus, parst sie, reduziert sie dabei auf die benötigten Daten und speichert sie in einer Datei ab. Die reduzierten Daten werden in einer SQL-Datenbank abgelegt und können dort abgefragt werden. Der zweite Teil besteht aus einer Reihe von Werkzeugen zur Analyse dieser Daten entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit.

3.1.2.1 Der SKS-Keyserver

SKS (Synchronizing Key Server) ist der Nachfolger der Keyserver-Software PKS (Public Key Server) ab und wird inzwischen auf so gut wie allen Keyservern benutzt. Mit *pgp.mit.edu* wurde im Juli 2009 der letzte große Keyserver auf SKS umgestellt. PKS benutzt ein auf E-Mails basierendes Protokoll zur Synchronisation zwischen Keyservern, das ausgesprochen ineffizient ist. Außerdem kommt es mit einigen Bestandteilen des aktuellen OpenPGP-Standards wie z.B. *PhotoIDs* und mehreren Unterschlüsseln nicht zurecht. PKS-Keyserver können über ein Webinterface, ein E-Mail-Interface und das auf HTTP basierende HKP-Protokoll¹ abgefragt werden.

Im Unterschied dazu kommunizieren SKS-Keyserver zur Synchronisation direkt (ohne Umwege über Mailserver) miteinander. Dazu wird ein binäres „Gossip“-Protokoll benutzt, das auf einem effizienten Algorithmus zum Abgleich von Datensätzen beruht [MiTZ03]. SKS unterstützt alle Bestandteile des OpenPGP-Standards.

SKS ist in der Sprache Objective Caml (OCaml) implementiert und benutzt die Datenbank Berkeley DB als Datenablage. Ein Datenbankeintrag besteht dabei aus einem kompletten OpenPGP-Key, d. h. einer Reihe von OpenPGP-Paketen. SKS ist in zwei Prozesse aufgeteilt: der *db*-Prozess beantwortet Datenbank-Abfragen für die verschiedenen Abfragemöglichkeiten (Webinterface, HKP) während der *recon*-Prozess für den Abgleich der Datenbank mit anderen Keyservern zuständig ist.

¹<http://tools.ietf.org/html/draft-shaw-openpgp-hkp-00>

3.1.2.2 Datenextraktion

Der Extraktionsteil wurde direkt in die SKS-Software integriert. Dadurch ergeben sich mehrere Vorteile:

- Das Interface von SKS für den Datenbankzugriff kann wiederverwendet werden
- SKS enthält einen rudimentären OpenPGP-Parser, d. h. eine Reihe von Funktionen, die die Byte-Struktur einzelner OpenPGP-Pakete sowie die Paket-Struktur des Schlüssels parsen und die darin enthaltenen Informationen in Datenstrukturen zugänglich machen. Durch die Verwendung dieser Funktionen kann auf eine eigene Implementierung eines OpenPGP-Parsers verzichtet werden.
- Die in SKS definierten Datenstrukturen für die Auswertung von OpenPGP-Paketen und weitere Hilfsfunktionen, beispielsweise für den Umgang mit OpenPGP-Fingerprints, können verwendet und erweitert werden

Derzeit läuft der Extraktionsteil in Form eines eigenen Prozesses, der einmalig den kompletten Datenbestand ausliest. Dieser Teil könnte aber auch direkt in den *db*-Prozess integriert werden, so dass der laufende Keyserver konstant neue oder geänderte Schlüssel reduziert und in der SQL-Datenbank ablegt. Auf diese Weise könnte ein ständig aktueller Datenbestand ohne den Aufwand des vollständigen Auslesens realisiert werden. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt, kann aber mit geringem Aufwand realisiert werden.

Da der Extraktionsprozess nur lesend auf die SKS-Datenbank zugreift, kann er die Daten auslesen, während die *recon*- und *db*-Prozesse laufen. Eine Unterbrechung des SKS-Betriebes ist nicht notwendig.

Als Sprache für die Implementierung wurde OCaml ausgewählt. Im Extraktionsteil bestand dafür aufgrund der Integration in SKS keine Wahl. Der Analyseteil wurde ebenfalls in OCaml implementiert. Da die dort verwendeten Daten ausschließlich aus der SQL-Datenbank stammen und dort nur primitive Datentypen (Strings, Ganz- und Fließkommazahlen) gespeichert werden, können aber für diesen Teil auch problemlos andere Sprachen verwendet werden.

Der Extraktionsteil iteriert über alle in der SKS-Datenbank enthaltenen Schlüssel. Jeder Schlüssel wird durch die in SKS enthaltenen Funktionen geparsst. Der Extraktionsteil muss dann noch

- entscheiden, ob der Schlüssel zurückgezogen oder abgelaufen ist. Dazu werden die Selbstsignaturen auf den einzelnen UserIDs betrachtet. Falls zu einer UserID mehrere Selbstsignaturen vorliegen, wird entsprechend der Empfehlung im OpenPGP-Standard nur die aktuellste verwendet. Liegt ein Rückrufzertifikat vor oder ist der Schlüssel abgelaufen, wird das Ablauf- bzw. Widerrufsdatum gespeichert.
- Fremdsignaturen sammeln. Dazu wird jede UserID betrachtet und die darauf angebrachten Signaturen ohne Duplikate gespeichert. Hier wird ebenfalls nur die neueste Signatur verwendet. Handelt es sich bei der neuesten Signatur um eine Widerruffssignatur, wird das Datum des Widerrufs gespeichert und zusätzlich die nächstältere Signatur gesucht, auf die sich der Rückruf bezieht.

- den Schlüssel und jede Fremdsignatur auf die benötigten Daten reduzieren. Für den Schlüssel sind dies (falls vorhanden) Rückzugs- und Ablaufdatum, die KeyID, die Liste aller UserIDs und die Information, welche davon die primäre UserID ist, das Erstellungsdatum des Schlüssels und der verwendete Public-Key-Algorithmus sowie dessen Schlüssellänge.

Eine Fremdsignatur wird reduziert auf die KeyID des Unterzeichners, den Zertifizierungslevel, das Erstellungsdatum der Signatur, falls vorhanden Ablauf- und Widerrufssdatum, den verwendeten Signaturalgorithmus und den verwendeten Public-Key-Algorithmus.

Grundsätzlich werden Schlüssel nur dann verworfen, wenn sie nicht parsebar, d.h. keine Abfolge gültiger OpenPGP-Pakete sind. Schlüssel, die zurückgezogen oder abgelaufen sind, werden unter Angabe des jeweiligen Datums trotzdem gespeichert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass der Datensatz möglichst vollständig ist. Für einen beliebigen Zeitpunkt stehen alle dann gültigen Schlüssel und Signaturen zur Verfügung. Es kann also gewissermaßen ein „Snapshot“ des Web of Trust zu einem beliebigen Zeitpunkt analysiert werden.

Sind alle Schlüssel extrahiert, werden noch solche Signaturen entfernt, deren erstellender Schlüssel im Datenbestand nicht vorhanden ist. Außerdem werden für Signaturen, die von einem Unterschlüssel erstellt wurden, die KeyID des signierenden Schlüssels auf die des Hauptschlüssels geändert. Dies ist notwendig, weil das hier verwendete Datenmodell keine Informationen über Unterschlüssel enthält.

Erwähnt werden muss, dass der Parse-Vorgang nur prüft, ob die Paketfolge eines Schlüssels dem OpenPGP-Standard entspricht. Es wird keinerlei kryptographische Verifizierung der Selbst- und Fremdsignaturen eines Schlüssels vorgenommen. Grundsätzlich können ohne Probleme Signaturpakete auf einem Schlüssel angebracht und diese auf einem Keyserver veröffentlicht werden, auch wenn der Ersteller nicht über das private Schlüsselmaterial für die kryptographische Signatur verfügt. Keyserver verifizieren keine Signaturen, so dass der Signaturteil des Pakets mit beliebigem Inhalt gefüllt werden kann. GnuPG und PGP verifizieren natürlich Signaturen, so dass eine solches Signaturpaket dort nicht verwendet wird und damit kein wirkliches Angriffspotential bietet. Eine Möglichkeit für den Extraktionsteil bestünde darin, die Signaturen jedes OpenPGP-Schlüssels mit GnuPG verifizieren zu lassen. Dagegen sprechen zwei Gründe: Einerseits wäre der Aufruf von GnuPG sehr zeitaufwendig. Für jeden Schlüssel müsste der Schlüssel in einen GnuPG-Schlüsselring eingefügt werden. Zusätzlich müssten noch alle Schlüssel, die den jeweiligen Schlüssel signiert haben, einzeln in der SKS-Datenbank gesucht und in den Schlüsselring eingefügt werden, um die Signaturen verifizieren zu können. Schließlich kostet der Aufruf von GnuPG selbst Zeit. Für die Anzahl der hier verarbeiteten Schlüssel (2,6 Millionen) scheint dieser Ansatz daher ungeeignet. Sicherlich sind Schlüssel mit defekten Signaturpaketen auf den Keyservern vorhanden. Allerdings müsste deren Anzahl sehr groß sein, um signifikante Änderungen in der Struktur des Graphen und den statistischen Auswertungen der Schlüsseleigenschaften zu erreichen. Eine große Zahl solcher Pakete scheint aber unwahrscheinlich, da zumindest unter Sicherheitsaspekten ein Angreifer damit keinen offensichtlichen Gewinn erreichen kann.

Die extrahierten Daten werden in einer SQL-Datenbank (PostgreSQL) abgelegt. Auf diese Weise kann darauf verzichtet werden, eigene Selektionsmechanismen zu

implementieren. Stattdessen kann die gewünschte Datenmenge einfach als SQL-Abfrage formuliert werden. Auf diese Weise ergibt sich eine flexible Abfragemöglichkeit. Die Ablage in der Datenbank ist zwar etwas langsamer als die Daten im Speicher zu halten. Andererseits müssen die Daten aber nicht jedes mal komplett in den Speicher geladen und dort gehalten werden. Außerdem werden effiziente Indexstrukturen der Datenbank genutzt und müssen nicht selbst implementiert werden.

3.1.2.3 Datenauswertung

Die Datenauswertung besteht aus einer Reihe von unabhängigen Werkzeugen, die die jeweiligen Analyseaufgaben implementieren. Diese sind als Kommandozeilenprogramme in separaten Prozessen realisiert. Eine Übersicht über die Aufteilung der Aufgaben auf die einzelnen Werkzeuge findet sich in Anhang B.

Die zur Community-Analyse verwendeten Algorithmen (siehe Abschnitt 3.3) wurden aus Zeitgründen nicht selbst implementiert. Stattdessen wurden Implementierungen der jeweiligen Autoren verwendet.

Parallelisierung mit MPI

Die in Abschnitt 2.3.2 definierten Kennzahlen Eccentricity, Durchmesser, Radius, h -Nachbarschaften und charakteristische Distanz ergeben sich sämtlich aus den Distanzen in einem Graphen. Der übliche Ansatz zur Berechnung dieser Kennzahlen ist, die Distanzmatrix

$$D = (d(u, v))_{u, v \in V} \quad (3.1)$$

zu berechnen, die die Distanz $d(u, v)$ in Zeile u und Spalte v enthält [BrSc04]. Aus dieser Matrix aller Distanzen im Graphen lassen sich alle oben angeführten Kennzahlen berechnen. D kann berechnet werden, indem das *single-source-shortest-path*-Problem (SSSP) für alle n Knoten oder das *all-pairs-shortest-path*-Problem (APSP) gelöst werden. Für den vorliegenden Fall eines ungewichteten Graphen lässt sich SSSP in $\mathcal{O}(n)$ durch Breitensuche lösen. Für die Berechnung der Distanzmatrix ergibt sich dann eine Komplexität von $\mathcal{O}(nm)$.

Dieser Ansatz ist hier aufgrund der Größe des vorliegenden Graphen nicht geeignet. Für diesen gilt $m > n$, so dass die Berechnung quadratisch in der Anzahl der Knoten ist. Das sequentielle Lösen von SSSP für jeden Knoten auf der zur Verfügung stehenden Hardware hätte einen Zeitaufwand von ca. 32 Stunden erfordert. Das Vorhalten der quadratischen Distanzmatrix erfordert eine erhebliche Menge Speicher (ca. 8 GiB, wenn Distanzen durch 4-Byte-Ganzzahlen repräsentiert werden).

Allerdings ist es nicht notwendig, die gesamte Distanzmatrix vorzuhalten. Eccentricity, h -Nachbarschaften und die durchschnittliche Distanz eines Knotens sind bestimmbar, wenn SSSP für diesen Knoten gelöst wurde. Durchmesser und Radius ergeben sich allein aus den Eccentricity-Werten für alle Knoten. Die Berechnung kann also parallelisiert werden, indem die Knotenmenge V in Teilmengen V_1, \dots, V_k aufgeteilt wird, die jeweils einer Berechnungseinheit zugewiesen werden. Jede Berechnungseinheit i löst dann SSSP für alle Knoten aus V_i . Die Ergebnisse müssen dann nur noch kombiniert werden, um Radius, Durchmesser und charakteristische Distanz des Graphen zu bestimmen.

Dieser Ansatz wurde auf einem Cluster realisiert, dessen Knoten mittels Message-Passing-Interface (MPI) kommunizieren. Eine zentrale *Master*-Instanz zerlegt die

Knotenmenge des Graphen und schickt jeder der k *Worker*-Instanzen die Menge V_k , für die diese zuständig ist. Jede *Worker*-Instanz k löst SSSP für alle Knoten aus V_k sequentiell und berechnet damit die gesuchten Kennzahlen. Die Ergebnisse werden an die *Master*-Instanz übermittelt, die sie kombiniert.

Da die Berechnung für die einzelnen Knotenmengen V_k komplett unabhängig läuft, beschränkt sich die notwendige Kommunikation zwischen den Instanzen auf das Zuteilen der Knotenmenge zu einer *Worker*-Instanz und die Übertragung der Ergebnisse zu der zentralen *Master*-Instanz. Dieser Ansatz skaliert also annähernd linear in der Anzahl der Berechnungseinheiten.

Die Berechnung wurde mit 24 *Worker*-Instanzen durchgeführt, wobei eine *Worker*-Instanz auf einem Core einer Quad-Core-Xeon-CPU ausgeführt wird. Insgesamt wurden also 7 Clusterknoten benutzt. Die notwendige Zeit für das Berechnen sämtlicher oben angeführter Kennzahlen reduzierte sich damit auf ca. 20 Minuten.

3.2 Schlüssel und Individuen

Ein Schwachpunkt der hier vorgenommenen Analyse soll nicht verschwiegen werden. Es wurde argumentiert, dass die Signaturbeziehungen im Web of Trust Abbild sozialer Beziehungen sind und der Graph deswegen als Abbild eines sozialen Netzwerks betrachtet werden kann. Allerdings stehen die Knoten dieses Netzwerks zunächst nicht für individuelle Personen, sondern für Schlüsselpaare. Eine einzelne Person kann selbstverständlich mehrere Schlüssel besitzen.

Das Problem, mehrere Schlüssel auf ein Individuum abzubilden, scheint nicht einfach. Zwar können anhand der UserID, die einen Namen und eine E-Mail-Adresse enthält, gleiche Personen auf mehreren Schlüsseln identifiziert werden. Allerdings können sich E-Mail-Adressen auch ändern, Namen können unterschiedlich geschrieben werden und Individuen können unter unterschiedlichen Namen oder Pseudonymen auftreten. Diese Vorgehensweise ist also vermutlich mit einer nicht unwesentlichen Fehlerrate verbunden. Ein schwerwiegenderes Problem ist aber, dass sich durch die Reduktion auf Individuen die Graphenstruktur erheblich verändern würde. Würden etwa alle Schlüssel einer Person und deren Signaturen auf einen Knoten zusammengefasst, ergäbe sich potentiell ein fundamental anderer Graph.

Dieser Ansatz wurde von Warren et al. [WaWW07] gewählt. In dem dort betrachteten PGP-Netzwerk aus dem Jahr 2006 verfügt jedes von 830.000 Individuen durchschnittlich über 2,38 Schlüssel.

Der Fokus dieser Arbeit liegt zunächst tatsächlich auf der Struktur der Signaturbeziehungen und nur sekundär auf der sozialen Komponente. Die Gültigkeit *vorhandener* Beziehungen wird durch das beschriebene Problem nicht beeinträchtigt. Aus diesen Gründen wurde auf eine Reduktion des Netzwerks verzichtet. Die Aussagekraft hinsichtlich sozialer Beziehungen und insbesondere über einzelne *Personen* sollte dann allerdings mit Vorsicht betrachtet werden.

3.3 Community-Analyse

3.3.1 Vorgehensweise

In Abschnitt 2.2.5 wurden Mechanismen beschrieben, die zur Entstehung des Web of Trust beitragen. Ausgehend davon kann die Annahme getroffen werden, dass die

Vernetzung wesentlich von zwei Faktoren beeinflusst wird: Teilnehmer vernetzen sich einerseits aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu einer *sozialen Gruppe*. Dabei kann es sich um Open-Source-Projekte wie z.B. Debian, akademische Einrichtungen und Firmen handeln, aber auch um eine Gruppe von Freunden oder Bekannten. Andererseits vernetzen sich Teilnehmer auf Keysigning-Parties mit einer relativ großen Anzahl Benutzer, die ihnen nicht unbedingt bekannt sind und mit denen sie keine starke Gruppenzugehörigkeit verbindet. Offensichtlich ist allerdings, dass diese Mechanismen sich nicht gegenseitig ausschließen. Die bereits in Abschnitt 2.2.5 beschriebene Bandbreite von Keysigning-Parties reicht von Ad-hoc-Veranstaltungen mit wenigen Teilnehmern, die durchaus der selben Institution angehörig sein können, bis zu großen, formalisierten Veranstaltungen auf Konferenzen und Messen mit etlichen Teilnehmern.

Es soll nun untersucht werden, inwiefern sich diese postulierten Entstehungsmechanismen in der Struktur, also den topologischen Eigenschaften, des Web of Trust wiederfinden. Angenommen wird, dass sich ein hoher Anteil der Teilnehmer primär anhand dieser beiden Mechanismen vernetzen und der Anteil an Signaturen zwischen Teilnehmern, die nicht durch eine Keysigning-Party oder eine soziale Gruppe entstanden ist, deutlich geringer ist. In diesem Fall ist zu erwarten, dass sich soziale Gruppen und die Ergebnisse von Keysigning-Parties als Gruppen von Knoten im Netzwerk wiederfinden, die untereinander eine hohe Anzahl von Kanten hat, d.h. *dicht* vernetzt ist, während sich zu Knoten außerhalb der Gruppe nur relativ wenige Kanten finden. Diese Eigenschaft entspricht exakt der in Abschnitt 2.3.6 beschriebenen Definition von *Communities*. Es erscheint als Methode deshalb sinnvoll, mit vorhandenen Methoden zur Community-Erkennung eine Zerlegung des Graphen zu berechnen und dann zu untersuchen, inwiefern sich die einzelnen so berechneten Communities entsprechend der Annahme auf soziale Gruppen bzw. Keysigning-Parties abbilden lassen. Beispielsweise könnten sich eine (oder mehrere) Communities ergeben, die von Mitgliedern des Debian-Projekts dominiert werden.

Dazu sind Kriterien nötig, um eine berechnete Community einer sozialen Gruppe, einer Keysigning-Party oder beidem zuzuordnen. Für Keysigning-Parties ist anzunehmen, dass die Signaturvorgänge zwischen den Teilnehmern einer KSP innerhalb eines eng begrenzten Zeitraums nach Stattfinden der KSP vorgenommen werden. Als einfaches Kriterium für die Erkennung einer Keysigning-Party kann also eine starke zeitliche Korrelation der Signaturvorgänge zwischen der Mehrzahl der Community-Mitglieder verwendet werden. Konkret wird hier eine Community als Produkt einer KSP betrachtet, wenn 80% der Signaturen zwischen den Mitgliedern innerhalb eines Monats vorgenommen wurden.

Die Zuordnung zu sozialen Gruppen wird dadurch erschwert, dass – abgesehen von den Schlüsseln und Signaturen selbst – keine empirischen Daten über die Gruppenzugehörigkeit vorliegen. Die einzigen Daten, die eine (primitive) Zuordnung erlauben, sind die in den UserIDs enthaltenen E-Mail-Adressen. Über die Top-Level-Domain (TLD) kann ein User einem Land zugeordnet werden, sofern es sich nicht um eine der generischen TLDs (com, org, net) handelt. Über die Second-Level-Domain kann versucht werden, einen Nutzer einer Institution zuzuordnen. Ein User, der beispielsweise über eine E-Mail-Adresse mit der Domain debian.org verfügt, ist sicherlich ein Mitglied des Debian-Projekts. Hilfreich dabei ist, dass Teilnehmer dazu tendieren, alle ihre Adressen auf ihren Schlüsseln zu vermerken, so dass viele Schlüssel mehrere

UserIDs und E-Mail-Adressen haben (siehe Abschnitt 4.4). Dadurch werden die verfügbaren Informationen über Gruppenzugehörigkeiten erhöht. Adressen verbreiteter „Freemail“-Anbieter wie Gmail, GMX und Yahoo sowie Adressen von Internet Service Providern dürfen dabei natürlich nicht verwendet werden, weil ihre Verwendung nichts über eine Gruppenzugehörigkeit aussagt.

Ähnlich wie für Keysigning-Parties werden wieder einfache Schwellwerte verwendet, um eine Community einer sozialen Gruppe, also einer Domain, zuzuordnen: Eine Community kann einer Domain *zugeordnet* werden, wenn mindestens 80% der Mitglieder eine UserID mit dieser Domain haben. Außerdem wird eine Community von einer Domain *dominiert*, wenn ein erheblicher Anteil – konkret mindestens 40% – der Mitglieder eine UserID mit dieser Domain haben.

Die Schwellwerte wurden nicht anhand empirischer Daten festgelegt sondern drücken nur ein intuitives Verständnis für die überwiegende Mehrzahl der Mitglieder einer Gruppe bzw. einen erheblichen Anteil der Mitglieder einer Gruppe aus.

Im Folgenden wird aufgeführt, welche Algorithmen zur Berechnung von Community-Zerlegungen verwendet wurden.

3.3.2 Communities im gerichteten Graphen

Der Graph des Web of Trust ist inhärent gerichtet, da eine Signatur nur in eine Richtung gilt. Die meisten verfügbaren Methoden zur Community-Erkennung setzen im Gegensatz dazu einen ungerichteten Graphen voraus. Methoden, die auf gerichteten Graphen arbeiten, sind erst in jüngster Zeit vorgestellt worden (beispielsweise [LeNe08] und [RoBe08]). In dieser Arbeit wird der Algorithmus „infomap“ von Rosval et al. [RoBe08] benutzt.

3.3.3 Communities im ungerichteten Graphen

Der bis jetzt am häufigsten verwendete Ansatz für die Community-Erkennung in gerichteten Netzwerken ist es, die Richtung der Kanten zu ignorieren und den Graphen als ungerichteten Graphen zu behandeln. Auch die Arbeiten, die den Web of Trust-Graphen unter Community-Gesichtspunkten analysieren oder ihn als Benchmark für den Vergleich von Algorithmen verwenden, gehen so vor (siehe Abschnitt 4.6). Auch wenn dieses Vorgehen akzeptable Resultate liefern kann, ist doch klar, dass durch das Ignorieren der Richtung ein Informationsverlust stattfindet, der die Ergebnisse negativ beeinflussen kann.

Da die Zerlegung des gerichteten Graphen keine verwertbaren Ergebnisse lieferte (siehe Abschnitt 4.3.1), wurde als Ausweichlösung auf diesen Ansatz zurückgegriffen. Im Fall des Web of Trust ist allerdings ein erheblicher Anteil der verbundenen Knotenpaare nur in eine Richtung verbunden, d.h. es existiert keine „Gegenkante“ (siehe Abschnitt 4.2). Damit ist auch der Informationsverlust durch die Reduzierung erheblich. Die Qualität der Community-Zerlegung und die sich daraus ergebende Zuordnung zu sozialen Gruppen und Keysigning-Parties stellt also sicher nicht das Optimum dar.

Wie bereits in Abschnitt 2.3.6 beschrieben, existiert – insbesondere für ungerichtete Graphen – eine Vielzahl von Methoden zur Zerlegung eines Graphen in Communities. Dabei hat sich bislang kein „bester“ Algorithmus herauskristallisiert, auch wenn einige

Algorithmen für eine Reihe von Benchmark-Graphen bessere Ergebnisse liefern als andere [LaFo09]. Basierend auf diesem Vergleich wurde der Algorithmus von Blondel et al. (siehe Abschnitt 2.3.6.4) ausgewählt, der außerdem gut auf große Graphen skaliert und für den eine Open-Source-Source-Implementierung verfügbar ist. Zwar existieren Algorithmen, die für kleinere Graphen bessere Ergebnisse liefern als die hier verwendeten, aufgrund ihrer Berechnungskomplexität für große Graphen wie den hier vorliegenden aber nicht geeignet sind.

3.3.4 Überlappende Communities im ungerichteten Graphen

Eine Zuordnung von einer Person zu genau einer sozialen Gruppe scheint unrealistisch. Statt dessen ist davon auszugehen, dass eine Person im Allgemeinen zu mehreren Institutionen oder Gruppen zugehörig ist. Ebenso ist es möglich, dass sie sich einerseits im Kontext einer sozialen Gruppe vernetzt, andererseits aber auch an Keysigning-Parties teilnimmt. Eine solche multiple Zugehörigkeit sollte sich im Netzwerk durch eine Mitgliedschaft eines Knotens in mehreren Communities ausdrücken. Wie in Abschnitt 2.3.6 erwähnt, existiert eine Klasse von Algorithmen, die ein Netzwerk in *überlappende* Communities zerlegt, so dass ein Knoten Teil von mehreren Communities sein kann. Um zu untersuchen, inwiefern dieser Überlappungseffekt die Zuordnung von Knoten zu sozialen Gruppen und KSPs beeinflusst, wurde zusätzlich noch eine überlappende Zerlegung mit dem Algorithmus COPRA (siehe Abschnitt 2.3.6.4) berechnet. COPRA erwartet einen Parameter v , der angibt, zu wie vielen Communities ein Knoten gehören kann. Um hier das Optimum bezüglich der Modularity zu finden, wurden Zerlegungen mit Werten $v = 2, \dots, 15$ berechnet. Zum Vergleich wurde eine Zerlegung mit $v = 1$ berechnet, die keine Überlappung erlaubt. Da COPRA nichtdeterministisch ist, wurden für jeden Wert 10 Berechnungen durchgeführt, um die Abweichung zu ermitteln.

4. Ergebnisse und Diskussion

In Abschnitt 4.1 wird zunächst der berechnete Datensatz allgemein charakterisiert. Abschnitt 4.2 untersucht die Struktur des sich daraus ergebenden Graphen. Die zeitliche Entwicklung der Größe des Web of Trust und Statistiken über die Verwendung von Algorithmen werden in den Abschnitten 4.4 und 4.5 dargestellt. Abschnitt 4.3 analysiert die Community-Struktur der größten starken Zusammenhangskomponente nach der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Vorgehensweise.

4.1 Datensatz

Die Extraktion der hier verwendeten Daten wurde, wie in Abschnitt 3.1.2.2 beschrieben, auf einem vom Verfasser betriebenen Keyserver am 02.12.2009 vorgenommen. Die Datenbank des Keyservers war zu diesem Zeitpunkt mit dem Rest des Keyserver-Netzwerkes vollständig abgeglichen. Der berechnete Datensatz enthält 2.725.504 Schlüssel und 1.145.337 zugehörige Signaturen, wobei hier keine Selbstsignaturen enthalten sind. 52.000 Schlüssel wurden während der Extraktion als defekt verworfen. Eine Stichprobe von 30 verworfenen Schlüssel ergab, dass diese auch von GnuPG nicht akzeptiert werden, weil sie entweder über keine UserID-Pakete verfügen oder aus anderen Gründen keine standardkonformen OpenPGP-Schlüssel darstellen. Von den nicht-defekten Schlüsseln sind 417.163 Schlüssel abgelaufen und 100.071 Schlüssel wurden zurückgezogen. Die in Relation zur Anzahl der Schlüssel niedrige Anzahl von Signaturen weist schon darauf hin, dass ein erheblicher Teil der (gültigen) Schlüssel nicht oder kaum vernetzt ist. In der Tat verbleiben nach Abzug von Schlüsseln, die weder ein- noch ausgehende Signaturen haben, nur 325.410 gültige Schlüssel und 816.785 zugehörige gültige Kanten, die den Graphen ausmachen.

Die große Mehrheit der im Keyserver-Netzwerk vorhandenen Schlüssel ist also komplett unvernetzt und nimmt von vorne herein nicht am Web of Trust teil. Die Überprüfung der Authentizität dieser Schlüssel anhand öffentlich verfügbarer Informationen ist nicht möglich. Die Besitzer dieser Schlüssel haben – sofern sie die Schlüssel überhaupt einsetzen – ebenfalls keine Möglichkeit, die Authentizität anderer Schlüssel zu prüfen. Über die Gründe für diese geringe Vernetzung kann hier nur spekuliert werden. Möglich ist etwa, dass die Benutzer schlichtweg keine Notwendigkeit

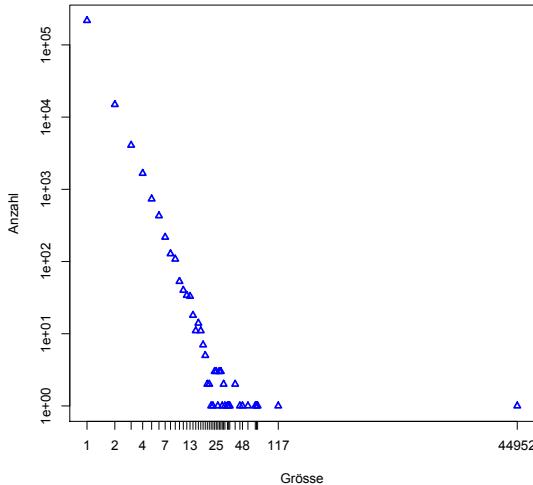


Abbildung 4.1: Größenverteilung der starken Zusammenhangskomponenten

in der Authentifizierung von Schlüsseln sehen, weil ihnen Man-in-the-middle und ähnliche Angriffe nicht bekannt sind, oder das im Web of Trust verwendete Modell zur Verifizierung von Schlüsseln zu komplex erscheint. Es kann selbstverständlich nicht ausgeschlossen werden, dass die Verifizierung über Signaturen läuft, die nicht auf öffentliche Keyserver geladen wurden. Beachtet werden muss auch, dass der Datensatz keine präzise Angabe über die momentane Anzahl von PGP-Benutzern erlaubt, da sich die Schlüssel über einen Zeitraum von 20 Jahren angesammelt haben.

4.2 Strukturelle Merkmale des Netzwerkes

4.2.1 Starke Zusammenhangskomponenten

Der Graph wurde zunächst in seine 240.382 starken Zusammenhangskomponenten zerlegt. Die Verteilung der Größen der Komponenten in Abbildung 4.1 zeigt dabei zwei Extreme: Es existiert eine einzelne gigantische Komponente mit ca. 45.000 Knoten. Demgegenüber steht eine geringe Anzahl von kleinen Komponenten bis zur Größe drei, insbesondere aber deutlich über 100.000 einelementige Komponenten, also einzelne Knoten, die nur *entweder* ein- oder ausgehende Kanten haben, und über 10.000 zweielementige Komponenten, also durch zwei Kanten verbundene Knotenpaare. Ein erheblicher Anteil der überhaupt vernetzten Knoten ist also wiederum nur sehr wenig vernetzt.

Abbildung 4.2 zeigt die Struktur der Zusammenhangskomponenten bis zur Größe sechs, die mit anderen Komponenten verbunden sind. Es ergibt sich eine sternförmige Struktur, bei der die kleineren Komponenten fast ausschließlich mit der größten Komponente verbunden sind und es so gut wie keine weitere Vernetzung gibt. Der Aufwand, der nötig ist, um zwei starke Zusammenhangskomponenten verschmelzen zu lassen, ist sehr gering: dazu ist nur genau eine Kante in jede Richtung nötig. Je mehr Kanten (also Signaturen) in eine Richtung verlaufen, desto wahrscheinlicher ist es, dass es zu einer dieser Kanten auch eine Gegenkante, also eine entsprechende Signatur in Gegenrichtung, gibt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Komponenten nur durch sehr wenige Kanten, die eben nur in eine Richtung

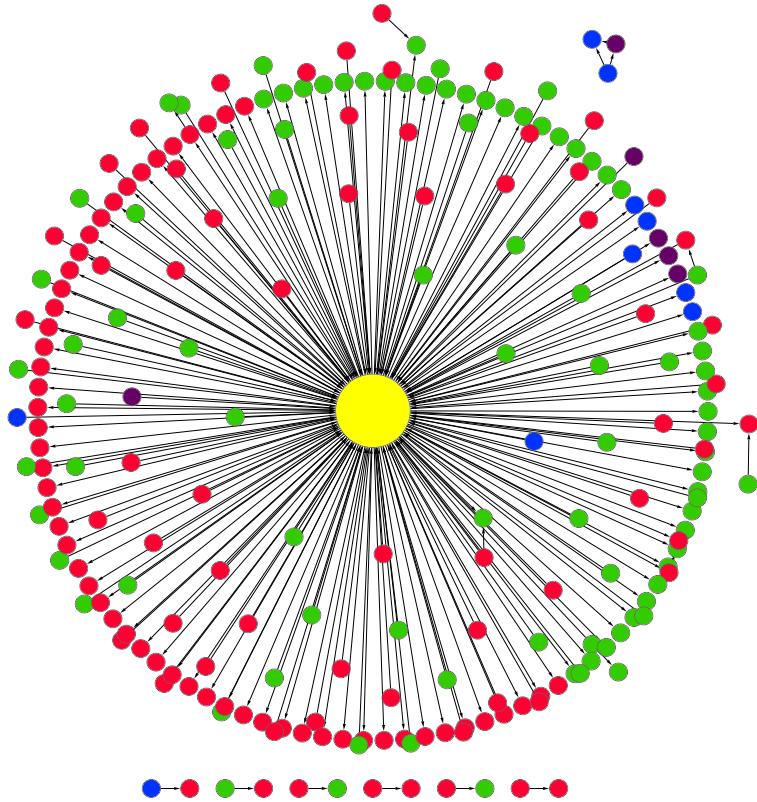


Abbildung 4.2: Sternförmige Struktur der starken Zusammenhangskomponenten bis zur Größe 6 (rot = Größe 6-10, grün = Größe 11-20, blau = Größe 21-30, violett = Größe ≥ 31 , gelb = MSCC)

verlaufen können, verbunden sind. Daraus ergibt sich, dass die Mitglieder der kleinen Komponenten nur eine sehr geringe Signaturaktivität aufweisen können. Würde eine nennenswerte Anzahl von Signaturen entstehen, so wäre die Wahrscheinlichkeit für das Verschmelzen von Komponenten sehr hoch. Die Anzahl kleiner Komponenten müsste in diesem Fall deutlich geringer sein.

Die *Nützlichkeit* des Web of Trust für die Teilnehmer, deren Schlüssel nicht in der größten starken Zusammenhangskomponente (MSCC) enthalten sind, ist gering: Die Menge der Schlüssel, die von einem Teilnehmer anhand von Signaturketten verifiziert werden kann, beschränkt sich zunächst auf die eigene Komponente und ist damit sehr klein. Zwar gibt es auch – wie oben gezeigt – Vernetzung zwischen kleineren Komponenten und der größten Komponente. Es existieren ca. 18.000 Knoten, die Knoten aus der größten Komponente direkt über eine einzige Kante erreichen können. Allerdings muss hier beachtet werden, dass das in PGP/GnuPG verwendete Verifizierungsmodell die Länge der verwendbaren Signaturketten begrenzt – in der Standardeinstellung von GnuPG auf die maximale Länge fünf (siehe Abschnitt 2.2.3). Schon innerhalb der größten Komponente sind viele kürzeste Pfade länger als dieses Maximum (siehe Abschnitt 4.2.2). Durch den zusätzlichen Schritt zu einem Knoten innerhalb der größten Komponente verlängert sich der Pfad. Insbesondere wenn es sich bei diesen Knoten um schwach vernetzte Knoten handelt, die am „Rand“ der größten Komponente liegen, ist die Menge der auf Pfaden benutzbarer Länge erreichbaren Knoten beschränkt. Kann die größte Komponente nur indirekt über

andere Knoten erreicht werden, reduziert sich diese Menge noch weiter. Gleiches gilt auch für die Erreichbarkeit der Menge von ca. 92.000 Knoten, zu denen eine Kante von Knoten der größten Komponente aus besteht.

Beachtet werden muss allerdings die Existenz von zentralen Certificate Authorities im eigentlich dezentralen Web of Trust. Mit den drei seit 1997 im Rahmen der „Krypto-Kampagne“ der Zeitschrift c’t (siehe Abschnitt 2.2.5) verwendeten Zertifizierungsschlüsseln wurden insgesamt 23.813 derzeit gültige Schlüssel unterschrieben. Von diesen liegen nur 2.578 Schlüssel innerhalb der größten Komponente. Wenn also nur dem verwendeten Zertifizierungsprozess und damit diesen drei Zertifizierungsschlüsseln vertraut wird, sind immerhin etwa 20.000 Schlüssel außerhalb der größten Komponente verifizierbar. Es zeigt sich hier auch die Flexibilität des Web of Trust-Konzeptes, das die Integration von zentralen Komponenten in das eigentlich dezentrale Netz erlaubt.

Insgesamt lassen diese Daten den Schluss zu, dass ausschließlich die größte starke Zusammenhangskomponente Schlüssel von Personen enthält, die sich durch regelmäßige Signaturaktivitäten am Web of Trust beteiligen und es zur Verifizierung von Schlüsseln benutzen.

4.2.2 Netzwerkstatistiken der größten starken Zusammenhangskomponente

Die weitere Untersuchung der Topologie des Graphen konzentriert sich auf die größte starke Zusammenhangskomponente. Starke Zusammenhangskomponenten als Einheit der Betrachtung machen Sinn, weil die Verwendung des Graphen für die Verifizierung von Schlüsseln gerade die Erreichbarkeit voraussetzt und weil eine Reihe von Netzwerkstatistiken nur definiert sind, wenn zwischen allen Paaren von Knoten Pfade existieren. Da im vorherigen Abschnitt argumentiert wurde, dass die größte starke Zusammenhangskomponente die einzige ist, die in größerem Maßstab vernetzt ist und in der Signaturaktivitäten stattfinden, scheint eine Untersuchung der restlichen Komponenten in diesem Rahmen nicht sinnvoll.

Der induzierte Teilgraph der größten starken Zusammenhangskomponente besteht aus 44.952 Knoten und 442.960 gerichteten Kanten. Dieser Teilgraph ist deutlich größer als die bisher in der Literatur verwendeten PGP-Netzwerke: ein gerichtetes Netzwerk von ca. 12.000 Knoten bei [CaBH02] und ein Netzwerk von 10.700 Knoten, bei dem alle einseitigen Signaturen gelöscht wurden bei [BnPSDGA04] und [Greg10]. Beide Netzwerke stellen die größte starke Zusammenhangskomponente dar und wurden im Jahr 2001 extrahiert.

4.2.2.1 Gegenseitigkeit von Kanten

Der *Reciprocity*-Wert eines gerichteten Graphen gibt den Anteil von Kanten an, die in beide Richtungen verlaufen. Für die größte Komponente ist dieser Wert 0,510. Das bedeutet, dass es für eine gegebene Kante eine Chance von 51% gibt, dass eine entsprechende „Gegenkante“ in umgekehrter Richtung existiert. Die Reciprocity eines zufälligen Graphen, der über die *gleiche Gradsequenz* wie die größte Komponente verfügt, hat im Vergleich eine Reciprocity von nur 0,006. Dass der reale Wert deutlich größer ist, ist nicht verwunderlich: Das Web of Trust ist eben kein Produkt eines zufälligen Prozesses, sondern von konkreten Mechanismen, nämlich gegenseitigen

Signierungen von Schlüsseln. Eher erstaunlich ist, dass der Wert nicht noch höher ist, dass also nicht noch mehr Signaturen auf Gegenseitigkeit beruhen. In Abschnitt 2.2.5 wurde dargestellt, dass die Signierung bei Keysigning-Parties und privaten Treffen üblicherweise gegenseitig verläuft, dass also beide Signaturpartner den Schlüssel des jeweils anderen unterschreiben. Es ist eine Reihe von Gründen denkbar, die dazu führen, dass der Anteil einseitiger Signaturen so hoch ist. Eine Rolle könnten dabei Certificate Authorities spielen. Diese signieren zwar eine Vielzahl von Schlüsseln, empfangen aber selbst weniger Signaturen¹. Außerdem können Signaturen aus verschiedenen Gründen nicht vorgenommen werden oder nicht auf Keyserver hoch geladen werden. Manche Personen könnten sich nachvollziehbarerweise dafür entscheiden, manche oder alle Signaturen nicht zu veröffentlichen, um ihre Privatsphäre zu schützen. Schlussendlich kann nicht davon ausgegangen werden, dass hinter jeder Signatur ein sinnvoller Prozess der Identitätsüberprüfung steht. Teilnehmer könnten etwa andere Schlüssel „zum Experimentieren“ unterschreiben. PGP und GnuPG zeigen eine Warnung an, wenn die E-Mail-Signatur eines Schlüssels überprüft wird, der nicht als *valide* eingestuft wird. Teilnehmer könnten dann versucht sein, Schlüssel zu unterschreiben, deren Authentizität sie nicht überprüft haben, um diese Warnung zu unterdrücken, selbst wenn dadurch der Sinn des Web of Trust untergraben wird.

Abbildung 4.3a zeigt die kumulative Verteilungsfunktion des Verhältnisses von ausgehendem zu eingehendem Grad für alle Knoten u in der größten starken Zusammenhangskomponente, also $\frac{d^+(u)}{d^-(u)}$. Aus dieser Verteilung ergibt sich, dass eine positive Korrelation zwischen dem eingehenden und dem ausgehenden Grad eines Knotens besteht. Für etwa die Hälfte der Knoten (21.817) unterscheidet sich der eingehende Grad um maximal 20% vom ausgehenden Grad. Diese Korrelation folgt aus der hohen Anzahl gegenseitiger Kanten und der Natur des Signaturprozesses, bei dem Schlüssel üblicherweise gegenseitig signiert werden.

4.2.2.2 Clustering und Small-World

Für die Berechnung des Clustering-Koeffizienten wurde der eigentlich gerichtete Graph als ungerichteter Graph betrachtet, da es keine anerkannte Definition des Clustering-Koeffizienten für gerichtete Graphen zu geben scheint. Diese Vorgehensweise scheint die in der Literatur übliche zu sein. Selbstverständlich ist anzunehmen, dass das Ergebnis verfälscht wird, wenn gerichtete Kanten als ungerichtete Kanten betrachtet werden. Allerdings wurde bereits gezeigt, dass ein erheblicher Anteil der Kanten symmetrisch ist, also in beide Richtungen verläuft, und eine positive Korrelation zwischen dem ausgehenden und dem eingehenden Grad von Knoten besteht. Die Verfälschung des Ergebnisses sollte sich also in Grenzen halten.

Der durchschnittliche Clustering-Koeffizient für die grösste starke Zusammenhangskomponente beträgt $C = 0,460$. Das bedeutet, dass *im Durchschnitt* etwa die Hälfte der Nachbarn eines Knoten wieder verbunden sind. Der Graph zeigt also ein erhebliches Mass an Clustering. Zum Vergleich beträgt der Clustering-Koeffizient für ein *zufälliges* Netzwerk mit der gleichen Anzahl von Knoten und Kanten $C = 0,00025$ und für ein *zufälliges* Netzwerk, das außerdem über die gleiche Sequenz von Graden verfügt, $C = 0,013$. In der größten starken Zusammenhangskomponente findet sich

¹Beispielsweise verfügt ein CA-Schlüssel, der 1684 Schlüssel in der größten Komponente unterschrieben hat, selbst nur über 683 Signaturen von Schlüsseln aus dieser Komponente

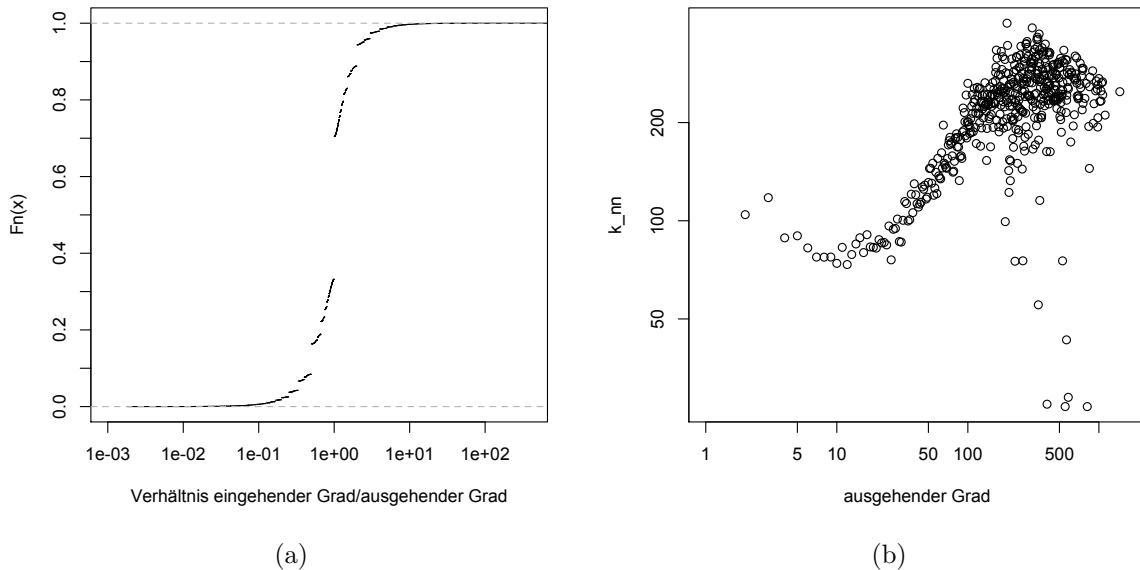


Abbildung 4.3: Kumulative Verteilungsfunktion von $\frac{d^+(u)}{d^-(u)}$ für alle Knoten u in der MSCC (a). Verteilung von k_{nn} über alle ausgehenden Grade (b).

also wesentlich mehr Clustering, als in einem zufällig entstandenen Netzwerk zu erwarten wäre.

Newman und Park bemerken, dass ein hohes Mass an Clustering charakteristisch für soziale Netzwerke ist und sie von vielen nicht-sozialen Netzwerken unterscheidet [NePa03]. Als möglichen Grund geben sie an, dass sich die Knoten in sozialen Netzwerken üblicherweise in *Communities* einteilen lassen, also Gruppen von Knoten, die untereinander stärker vernetzt sind als nach außen. Intuitiv ist nahe liegend, dass in einer solchen Community die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Nachbarn eines Knoten durch eine Kante verbunden sind, hoch ist. In Abschnitt 4.3 wird gezeigt, dass der vorliegende Graph in der Tat über eine ausgeprägte Community-Struktur verfügt.

Der Durchschnitt aller Distanzen in der größten starken Zusammenhangskomponente beträgt 12,14 (siehe auch Abbildung 4.6a für die Verteilung der durchschnittlichen Distanzen pro Knoten). Dieser Wert ist in Relation zur Anzahl der Knoten im Netzwerk gering und zeigt, dass der Graph den „Small-World“-Effekt aufweist, dass also Paare von Knoten mit hoher Wahrscheinlichkeit durch einen Pfad von geringer Länge verbunden sind. Dieser Effekt tritt in vielen untersuchten Netzwerken auf und ist insbesondere typisch für soziale Netzwerke [Newm03].

Interessant ist die geringe Distanz auch, weil die Teilnehmer des Web of Trust aus verschiedenen Ländern und damit aus verschiedensten geographischen Regionen stammen. Die übliche Prozedur für das Signieren von Schlüsseln setzt ein direktes, d. h. räumliches Treffen der teilnehmenden Personen voraus. Eine Interpretation der geringen Distanz wäre, dass eine Anzahl von Teilnehmern geographisch so mobil ist, dass sich Signierungen an weit auseinander liegenden Orten ergeben, die für die Verbindungen zwischen geographisch eigentlich weit entfernten Bereichen im Netzwerk sorgen. Allerdings wurde hier nur der Durchschnitt der Distanzen betrachtet. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich der niedrige Durchschnitt

für die einzelnen Knoten nur ergibt, weil die Knoten aus dem eigenen Land bzw. der eigenen geographischen Region auch im Netzwerk sehr nahe liegen. In Abschnitt 4.3 wird gezeigt, dass sich die meisten Communities anhand von Top-Level-Domains einem Land oder Sprachraum zuordnen lassen. Interessant wäre an dieser Stelle eine Untersuchung, inwiefern sich die geographische Distanz der Länder auch in der Distanz im Netzwerk der entsprechenden Communities wiederspiegelt.

4.2.2.3 Verteilung der Grade, Skalenfreiheit

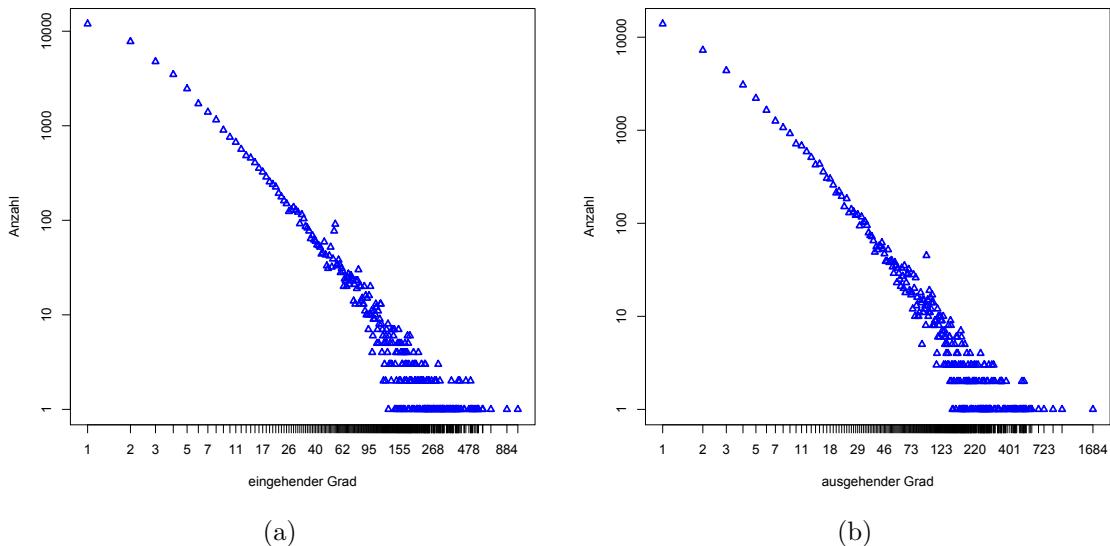


Abbildung 4.4: Verteilung der eingehenden (a) und ausgehenden (b) Knotengrade in der größten starken Zusammenhangskomponente.

Der durchschnittliche ausgehende Grad (und damit auch der durchschnittliche eingehende Grad) beträgt 9,29. Allerdings zeigen Abbildung 4.4a und 4.4b, dass dieser Durchschnitt auf höchst ungleichmäßige Weise zustande kommt. Während eine Mehrheit der Knoten einen sehr kleinen ein- bzw. ausgehenden Grad hat, existiert eine signifikante Anzahl von Knoten, deren Grad deutlich über dem Durchschnitt liegt. Dieses Verhalten scheint konsistent mit einer Power-Law-Verteilung der Grade und die in etwa geraden Linien im doppelt logarithmischen Plot der Verteilungen legen dies zusätzlich nahe. Allerdings wird in [CISN09] argumentiert, dass ein „Nachweis“ einer Power-Law-Verteilung und insbesondere die Berechnung des Power-Law-Koeffizienten etwa mit linearer Regression auf einem doppelt logarithmischen Plot (vorgeschlagen etwa bei [BrSc04]) zu stark verfälschten Ergebnissen führen kann. Stattdessen wird hier die von Clauset et al. vorgeschlagene Vorgehensweise benutzt, die beste Power-Law-Anpassung mittels der Maximum-Likelihood-Methode zu berechnen. Damit ergibt sich für die Verteilung der ein- bzw. ausgehenden Grade ein Power-Law-Koeffizient von 2,35 bzw. 2,29. Allerdings ergibt die Überprüfung der Qualität der Anpassung mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests Werte, die mit $p = 0,012$ und $p = 0,011$ deutlich unter dem in [CISN09] empfohlenen Schwellwert von $p = 0,1$ liegen und damit ein Power-Law als plausible Hypothese für die Verteilung ausschließen.

Es handelt sich bei dem vorliegenden Netzwerk also nicht um ein skalenfreies Netzwerk im engeren Sinne. Es stellt sich allerdings die Frage, ob das überhaupt relevant ist.

Zum einen zeigt die Verteilung der Grade Merkmale, die mit charakteristischen Merkmalen einer Power-Law-Verteilung übereinstimmen, nämlich die hohe Variabilität der Grade und insbesondere die Anwesenheit einer signifikanten Anzahl von Knoten mit hohem Grad. Die Verteilung *ähnelt* also immerhin einer Power-Law-Verteilung. Eine zentrale Rolle bei den Eigenschaften, die skalenfreien Netzwerken zugeschrieben werden, spielt die Existenz eines Kerns bestehend aus untereinander verbundenen, stark vernetzten „Hubs“. Knoten mit niedrigem Grad sind primär mit diesen Hubs verbunden. Dieser Kern ist essentiell für den Zusammenhang des Netzwerkes und sorgt für geringe Distanzen. Allerdings haben Li et al. [LADW05] gezeigt, dass die Existenz einer Power-Law-Verteilung nicht ausreicht, um die Existenz von Hubs nachzuweisen. Es existieren Netzwerke, die zwar eine Power-Law-Verteilung der Grade haben, bei denen die Knoten mit hohem Grad aber eher an der *Peripherie* liegen und keine zentrale Rolle im Sinne von Hubs übernehmen. Hubs ergeben sich erst dann, wenn Knoten mit hohem Grad primär mit Knoten vernetzt sind, die wiederum einen hohen Grad haben. Eine tatsächliche Power-Law-Verteilung ist für die Existenz einer Hub-Struktur nicht notwendig, es reicht als notwendiges Kriterium bereits eine Verteilung mit hoher Variabilität (ebd.). Eine solche ist hier vorhanden.

Um zu überprüfen, ob die gut vernetzten Knoten tatsächlich als Hubs fungieren, wurde zunächst die Korrelationsfunktion k_{nn} berechnet. Diese verbindet für gerichtete Graphen einen Grad d mit dem Durchschnitt des Grads der Nachbarn der Knoten, die diesen Grad d haben. Sie misst also, wie hoch der Grad von Knoten ist, die mit Knoten vom Grad d verbunden sind. Abbildung 4.3b zeigt die Verteilung von k_{nn} über alle Grade d . Aus der ansteigenden Kurve für ansteigende Grade kann geschlossen werden, dass Knoten mit hohem Grad dazu tendieren, zu anderen Knoten mit hohem Grad verbunden zu sein. Diese Knoten scheinen also in der Tat einen *Kern* des Netzwerkes zu bilden. Um dies zu untermauern, wurde zusätzlich noch der Assortativity-Koeffizient r [Newm02] berechnet. Ein positiver Wert von r bedeutet, dass eine positive Korrelation zwischen den Graden der Knoten besteht. Im gegensätzlichen Fall einer negativen Korrelation ist r negativ. Es ergibt sich ein Wert $r = 0,113$. Aus diesem positiven Wert folgt also ebenfalls, dass Knoten tendenziell mit Knoten verbunden sind, die einen ähnlichen Grad haben. Der r -Wert ähnelt den Werten, die für andere soziale Netzwerke berechnet wurden [Newm03].

4.2.3 Robustheit

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach der *Robustheit* des Netzwerkes. Eine Eigenschaft, die skalenfreien Netzwerken üblicherweise zugeschrieben wird, ist eine charakteristische Reaktion auf das Entfernen von Knoten: Während die Entfernung zufällig ausgewählter Knoten kaum Schaden anrichtet, reagiert das Netzwerk sehr verwundbar auf die Entfernung von Knoten, die sehr gut vernetzt sind. Schon die Entfernung weniger sehr gut vernetzter Knoten führt dazu, dass das Netzwerk zerfällt. Dieses Verhalten wird damit erklärt, dass der Zusammenhang des Netzwerks fast ausschließlich durch die kleine Gruppe sehr stark vernetzter Hubs bestimmt wird [AlJB00].

Dieser Unterschied kann aufgefasst werden als der Unterschied zwischen einem gerichteten *Angriff* und einer zufälligen *Schädigung*. Ein Angreifer mit der Intention, das Netz an sich zu schädigen, wird solche Knoten auswählen, deren Entfernung einen möglichst großen Effekt hat. Demgegenüber kann angenommen werden, dass

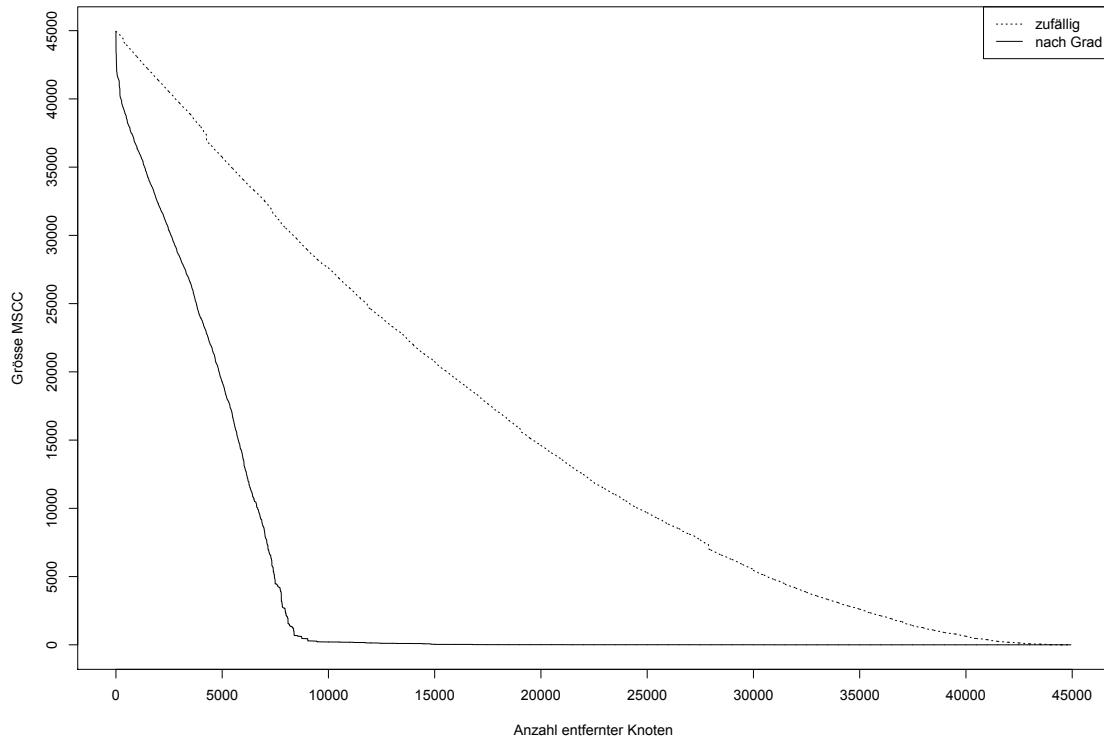


Abbildung 4.5: Entwicklung der Größe der größten starken Zusammenhangskomponente, wenn Knoten zufällig oder nach absteigender Größe entfernt werden

die Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Schädigung in etwa gleich verteilt über alle Schlüssel ist. Ein Angreifer könnte beispielsweise versuchen, Knoten zu entfernen, indem er den Schlüssel an sich kompromittiert oder den Zugriff auf das Schlüsselmaterial unmöglich macht, so dass der Schlüssel widerrufen werden muss. Demgegenüber können Schlüssel auf „normalem“ Wege aus dem Netz verschwinden, wenn sie ablaufen oder beispielsweise aufgrund des Verlusts der Passphrase widerrufen werden müssen.

Eine offensichtliche Metrik für die Wichtigkeit eines Knotens und damit eine Strategie für die Auswahl des Zielknotens ist der Knotengrad. Je höher der Grad eines Knotens, desto wichtiger ist er potentiell für das Netzwerk. Um die Robustheit unter dieser Auswahlstrategie zu testen, wurden aus der größten starken Zusammenhangskomponente sukzessive Knoten in der Reihenfolge absteigender ausgehender Grade bzw. in einer zufälligen Reihenfolge entfernt. Abbildung 4.5 zeigt die Entwicklung der Größe der größten Komponente, wenn mehr und mehr Knoten entfernt werden. Bei der Entfernung zufällig ausgewählter Knoten ist das Netzwerk ausgesprochen stabil. Die größte Komponente schrumpft fast im gleichen Ausmaß, wie Knoten entfernt werden, woraus geschlossen werden kann, dass nur einzelne Knoten oder sehr kleine Gruppen abgetrennt werden. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend. Da ein hoher Anteil der Knoten einen sehr niedrigen Grad hat, ist bei zufälliger Auswahl die Chance, einen solchen Knoten zu treffen, hoch. Das Verschwinden von Schlüsseln durch die Überschreitung des Ablaufdatums ist ein normaler und häufiger Prozess. So verfügen etwa 5.700 Schlüssel in der größten starken Zusammenhangskomponente über ein Ablaufdatum, werden also irgendwann aus dem Netz verschwinden. Dieser Fall richtet also kaum globalen Schaden im Netzwerk an.

Abbildung 4.5 zeigt ebenfalls, dass die Entfernung von Knoten geordnet nach absteigendem ausgehendem Grad die Größe der größten starken Zusammenhangskomponente deutlich schneller reduziert als im Fall der zufälligen Reihenfolge. Dies ist nicht verwunderlich, da bei der geordneten Reihenfolge am Anfang mit jedem Knoten im Durchschnitt eine sehr viel größere Anzahl von Kanten entfernt wird. Da das Netzwerk eine sehr große Anzahl von Knoten mit sehr niedrigem Grad enthält, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass eine Reihe dieser Kanten solche schlecht vernetzten Knoten vollständig abtrennt.

Andererseits ist die Abnahme der Größe der MSCC zu langsam, als dass von einem rapiden Zerfall gesprochen werden könnte. Die Entfernung der 240 Knoten mit den höchsten Graden – dies entspricht der Entfernung aller Knoten mit einem ausgehenden Grad von mindestens 160 – reduziert die Größe der MSCC auf 40.000 Knoten. Auch wenn damit eine signifikante Anzahl von Knoten abgetrennt wird, wird das Netzwerk als Solches damit noch lange nicht fundamental fragmentiert. Selbst die Entfernung von 5000 Knoten (d.h. Knoten mit einem Grad von mindestens 18) lässt noch eine größte starke Zusammenhangskomponente von etwa 20.000 Knoten übrig.

Es zeigt sich, dass die am besten vernetzten Knoten nicht so zentral für den Zusammenhang des Netzwerkes sind, dass schon die Entfernung einer kleinen Anzahl dieser Knoten zu einer rapiden Fragmentierung führt. Die Fragmentierung verläuft deutlich langsamer als in der Literatur für untersuchte „skalenfreie“ Netzwerke angegeben (beispielsweise bei [AlJB00]). Es scheint damit keine Hub-Struktur im Sinne der Literatur zu „skalenfreien“ Netzwerken vorzuliegen.

Das Netzwerk scheint also selbst gegenüber einer sehr groß angelegten Attacke recht robust zu sein. Die Möglichkeiten eines realistischen Angreifers dürften sich eher im Entfernen einzelner Knoten erschöpfen, so dass der zu erwartende Schaden gering ist.

Angemerkt werden muss aber, dass neben der Größe der Komponente auch eine Betrachtung der Entwicklung der Distanzen in der Komponente sinnvoll wäre. Dass die Größe der Komponente sich im Fall zufälliger Reihenfolge sehr stabil und im Fall der geordneten Reihenfolge recht stabil verhält, muss nicht bedeuten, dass sich die durchschnittlichen Distanzen nicht deutlich vergrößern. Vergrößern sich die Distanzen und verlängern sich damit die nötigen Signaturketten, so sinkt die Nützlichkeit des Netzwerkes (siehe Abschnitt 4.2.4). Für die Entfernung von Knoten anhand des Grades wird erwartet, dass sich die Distanzen schon durch die Entfernung weniger Knoten merklich erhöhen. Aufgrund des notwendigen Rechenaufwandes konnte dies im Rahmen dieser Arbeit aber nicht überprüft werden.

Der Grad eines Knotens ist nicht unbedingt das geeignetste Maß für die globale „Wichtigkeit“ des Knotens. Durch eine Konzentration auf *zentrale* Knoten, also etwa solche mit einer hohen Betweenness Centrality, lässt sich möglicherweise mehr Schaden anrichten. Dies lässt sich am Beispiel von Certificate Authorities im Web of Trust illustrieren: CA-Schlüssel haben zwar üblicherweise einen hohen ausgehenden Grad, haben also viele Schlüssel signiert und damit relativ kurze Wege zu vielen Schlüsseln. Allerdings haben sie üblicherweise gleichzeitig einen niedrigeren eingehenden Grad, weil ein CA-Schlüssel üblicherweise nicht mit einer Person direkt verbunden ist, und damit das übliche Verifizieren der Identität wenig Sinn macht. Damit tauchen CA-Schlüssel nur auf relativ wenigen kürzesten Pfaden auf, da sie selbst eher schlecht erreichbar sind. Ihre Entfernung richtet also – zumindest in Bezug auf die Distanzen – einen relativ geringen Schaden an.

4.2.4 Nützlichkeit

Dieser Abschnitt betrachtet die Nützlichkeit des Netzwerkes für seinen eigentlichen Zweck, die Verifizierung von Schlüsseln. Diese Nützlichkeit ist dann hoch, wenn für viele Knoten eine hohe Zahl von Knoten potentiell verifizierbar ist.

Eine Mindestvoraussetzung für die Verifizierung eines Schlüssels ist, dass eine Signaturkette zu diesem Schlüssel aufgebaut werden kann, dass also der Knoten im Graph erreicht werden kann. Dies ist in einer starken Zusammenhangskomponente der Fall, da laut Definition ein Pfad von jedem Knoten zu jedem anderem Knoten besteht. Allerdings ist die Erreichbarkeit an sich hier nicht von Bedeutung. Vielmehr muss die Erreichbarkeit unter den Beschränkungen des PGP/GnuPG-Vertrauensmodells (siehe Abschnitt 2.2.3) betrachtet werden. Hier gilt insbesondere die Einschränkung, dass Signaturketten in der Standardeinstellung maximal die Länge 5 haben dürfen. Selbstverständlich bedeutet das Vorhandensein einer Signaturkette von hinreichend geringer Länge noch nicht, dass ein Schlüssel tatsächlich verifizierbar ist. Zusätzlich muss noch jedem Glied dieser Kette *vertraut* werden. Wird Personen nur *geringfügig* vertraut, sind zusätzlich noch weitere redundante Signaturen nötig. Da diese Vertrauensinformationen aber nicht öffentlich verfügbar sind, wird hier als obere Grenze für die Anzahl verifizierbarer Schlüssel nur die maximale Pfadlänge verwendet.

Die größte Komponente enthält eine erhebliche Anzahl von Knoten mit einem ausgehenden Knotengrad von 1. Ein solch niedriger Grad stellt eine erhebliche Einschränkung für die Benutzbarkeit dieses Schlüssels für die Verifizierung von anderen Schlüsseln dar. Da ein Schlüssel A mit ausgehendem Grad 1 nur einen Schlüssel B signiert hat, gibt es auch nur genau einen Schlüssel, über den eine Signaturkette aufgebaut werden kann. Natürlich wird dadurch die Menge der insgesamt erreichbaren Knoten stark eingeschränkt. Außerdem aber existiert damit keine Redundanz. Der Besitzer des Schlüssels A muss dem Besitzer des Schlüssels B vertrauen, wenn er irgendeine Signaturkette benutzen will. B stellt einen *Single point of failure* dar, da A vom Netz getrennt wird, wenn B etwa abläuft oder zurückgezogen wird. Äquivalent ist die Verifizierbarkeit eines Knotens A stark eingeschränkt, wenn er einen eingehenden Grad von 1 hat und nur von einem einzigen Schlüssel B signiert wurde. Für die Verifizierung von A muss zwingend dem Besitzer von B vertraut werden. Ist B nicht mehr benutzbar, wird A vom Netz getrennt.

Aus Abbildung 4.6b ist ersichtlich, dass die Eccentricity, also die *maximale* Distanz eines Knotens zu einem anderen Knoten, zwischen dem Minimum 16 (dem *Radius* des Graphen) und dem Maximum 36 (dem *Durchmesser* des Graphen) liegt. Für die meisten Knoten liegt sie bei 26 bis 31. Damit wird die maximale Pfadlänge deutlich überschritten. Für alle Knoten gilt also, dass die am weitesten entfernten Knoten grundsätzlich nicht erreichbar sind. Aber auch schon die *durchschnittliche* Distanz (Abbildung 4.6) ist für eine erhebliche Anzahl von Knoten größer als die maximal erlaubte Länge. Klar ist also, dass für die Mehrzahl der Knoten längst nicht alle Knoten unter der Beschränkung der Pfadlänge erreichbar sind.

Die Größe der 5-Nachbarschaft eines Knotens gibt die Anzahl der Knoten an, die unter dieser Beschränkung erreichbar sind. Allerdings macht es Sinn, nicht nur die 5-Nachbarschaft, sondern auch die n -Nachbarschaften für $n = 2, \dots, 4$, also kürzere Signaturketten, zu betrachten. Da jedem einzelnen Glied einer Signaturkette vertraut werden muss, steigt mit der Länge der Kette auch die Wahrscheinlichkeit, dass dieses

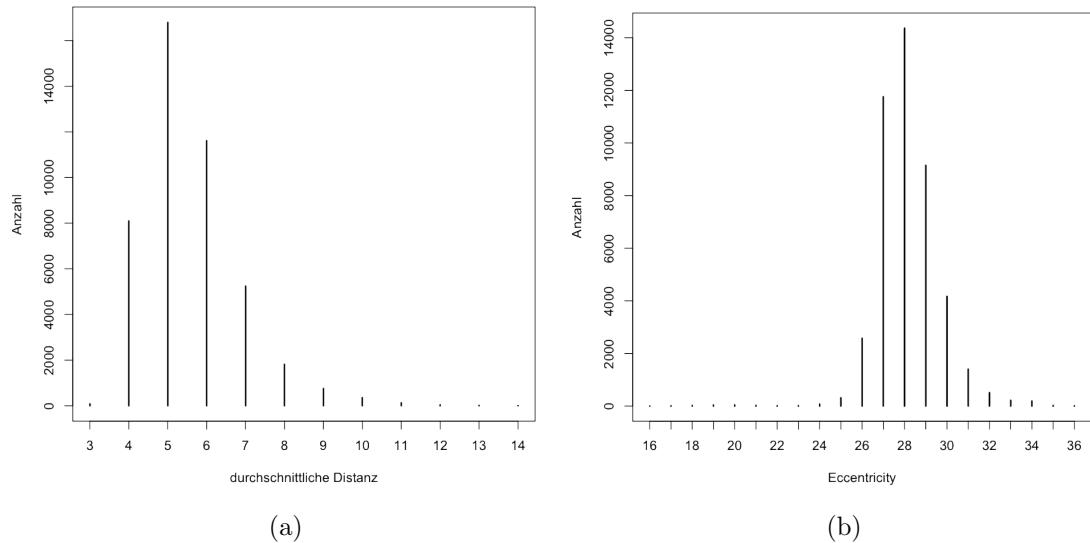


Abbildung 4.6: Verteilung der (gerundeten) durchschnittlichen Distanzen (a) und der Eccentricity (b) in der größten starken Zusammenhangskomponente

Vertrauen eben nicht in alle Glieder vorhanden ist. Da das Web of Trust ein soziales Netzwerk darstellt, kann angenommen werden, dass im Allgemeinen mit der Entfernung zu einem Knoten im Graph auch die soziale und geographische Entfernung zu der entsprechenden Person steigt. Damit sinkt auch die Wahrscheinlichkeit, dass weiter entfernten Personen aufgrund von persönlicher Bekanntschaft vertraut werden kann. Dass einer Person, deren Schlüssel selbst signiert wurde, vertraut wird, ist wahrscheinlicher als dass einer Person vertraut wird, deren Schlüssel nicht selbst signiert wurde. Es scheint also plausibel, dass die Wahrscheinlichkeit für die Benutzbarkeit einer Signaturkette sinkt, je länger diese wird.

Abbildung 4.7 zeigt die kumulative Verteilungsfunktion der Größe der Nachbarschaften. Auffällig ist hier zunächst das steile Wachstum der Kurve für die 2-Nachbarschaft, woraus geschlossen werden kann, dass diese Nachbarschaft für fast alle Knoten sehr klein ist. In der Tat liegt das 2. Quartil bei 30 und das 3. Quartil bei 160. Für die Mehrzahl der Schlüssel ist also die Menge der Schlüssel, für deren Verifizierung nur einer Person voll vertraut werden muss, sehr gering. Immerhin steigt die Größe der Nachbarschaften mit wachsender Distanz deutlich: Für $n = 3$ liegt das 3. Quartil bereits bei 3.371. Für $n = 4$ und $n = 5$ beträgt es 16.340 bzw. 30.530. Mittels längerer Signaturketten kann also die Mehrzahl der Teilnehmer einen signifikanten Anteil der in der größten Zusammenhangskomponente vorhandenen Schlüssel *potentiell* erreichen. Interessanterweise liegt das Maximum der Größe der Nachbarschaften für $n = 5$ bei nur 40.180. Nicht einmal für die am besten vernetzten Schlüssel sind also alle Schlüssel mit beschränkter Kettenlänge erreichbar.

Wie bereits erwähnt, enthält die größte Zusammenhangskomponente die Schlüssel mehrerer zentraler Certificate Authorities. Interessant ist eine Abschätzung, wie sehr das eigentlich dezentrale Web of Trust auf diese zentralen Komponenten aufbaut. Um dies festzustellen wurden die Schlüssel der größeren Certificate Authorities (siehe Abschnitt 2.2.5) aus der größten Komponente entfernt. Diese CA-Schlüssel haben zusammen in dieser Komponente 4.256 Schlüssel signiert. Nach der Entfernung der

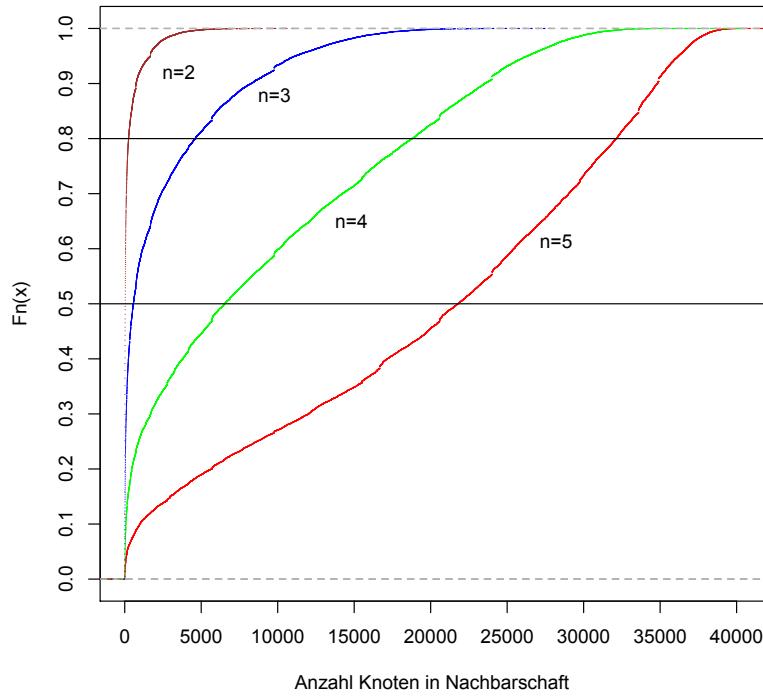


Abbildung 4.7: Kumulative Verteilungsfunktion der Nachbarschaftsgrößen in der größten starken Zusammenhangskomponente

CA-Schlüssel zerfiel die größte Komponente in eine Reihe von starken Zusammenhangskomponenten: Eine größte Komponente mit 42.455 Schlüsseln und 1.058 sehr kleine Komponenten. Daraus ergibt sich, dass die CA-Schlüssel die größte Komponente zwar nicht fundamental zusammenhalten. Für immerhin 2.497 Schlüssel in der größten Zusammenhangskomponente ist aber das Vorhandensein und die Benutzung der CA-Schlüssel entscheidend, da sie andernfalls nicht erreichbar sind.

4.3 Communities

4.3.1 Ergebnisse für den gerichteten Graphen

Die Zerlegung des gerichteten Graphen mit dem Algorithmus von Rosval et al. lieferte keine verwertbaren Ergebnisse. Zwar wurde eine Zerlegung in 2869 Partitionen berechnet. Allerdings gilt für die große Mehrzahl dieser Knotenmengen, dass der durch sie induzierte Teilgraph überhaupt keine Kanten hat. Nur für ca. 160 Partitionen hat der jeweils induzierte Teilgraph Kanten, in allen Fällen allerdings sehr wenige (zwischen 1 und 104 für eine Partition der Größe 682). Dass die Knoten einer Partition in allen Fällen so gut wie keine interne Vernetzung haben und damit der Definition von Communities absolut nicht entsprechen, ist ein klarer Hinweis, dass die berechnete Zerlegung die tatsächliche modulare Struktur des Graphen nicht sinnvoll wiedergibt. Dass der Graph in der Tat eine ausgeprägte modulare Struktur hat, zeigen die anhand des ungerichteten Graphen berechneten Zerlegungen, die auch unter inhaltlichen Gesichtspunkten Sinn ergeben. Die berechnete Zerlegung mit etlichen großen Partitionen ohne interne Vernetzung ist in keinem Fall ein sinnvolles Ergebnis

eines Community-Algorithmus und spricht daher für eine fehlerhafte Berechnung. Ob diese allerdings auf Fehler in der verwendeten Implementierung der Autoren² oder auf Fehler im Algorithmus zurückgeht, ist nicht bekannt.

4.3.2 Ergebnisse für den ungerichteten Graphen

Für die restlichen Methoden wurde der Graph auf einen ungerichteten Graphen reduziert. Dazu wurde jede einzelne gerichtete Kante in eine ungerichtete Kante umgewandelt. Aus dem gerichteten Graphen mit 446.326 Kanten ergab sich so ein ungerichteter Graph mit 295.425 Kanten.

Für die COPRA-Berechnung wurden – wie in [Greg10] vorgeschlagen – Berechnungen mit unterschiedlichen Werten v durchgeführt, um den „besten“ Wert im Sinne der Modularity zu ermitteln. Dabei ergaben sich mit steigender maximaler Überlappung v nur bis $v \leq 3$ steigende Modularity-Werte, darüber hinaus fielen sie kontinuierlich ab. Deshalb wurde die Berechnung mit $v = 3$ verwendet. Die dort berechneten Modularity-Werte hatten eine geringe Standardabweichung von 0,003. Dieses Ergebnis kommt unerwartet. In [Greg10] ergaben sich für ein PGP-Web-of-Trust-Netzwerk mit 10.680 Knoten bis zu $v = 9$ ansteigende Modularity-Werte. Das (lokale) Maximum bei geringem v für das hier verwendete Netzwerk könnte darauf hinweisen, dass seine Community-Struktur keine signifikante Überlappung aufweist. Ein weiterer Hinweis darauf ist, dass die Einführung der Überlappung mit $v = 3$ gegenüber der nicht überlappenden Berechnung mit $v = 1$ für die Modularity (Tabelle 4.1) keinen signifikanten Anstieg brachte. Auch die Zuordnung zu Gruppen bzw. Keysigning-Parties (Tabelle 4.2) und die Verteilung der Größe der Communities (Abbildungen 4.8b und 4.8a) ähneln sich weitgehend. Alternativ könnte dieses Ergebnis allerdings auch in einem nicht-optimalen Verhalten des Algorithmus begründet liegen.

Wie in Abschnitt 2.3.6 beschrieben, verläuft der Algorithmus von Blondel et al. iterativ in Phasen, in denen jeweils zuerst Knoten einer benachbarten Community zugeordnet werden, wenn sich dadurch ein Modularity-Gewinn erzielen lässt, und dann die Knoten dieser so entstandenen Communities zu Knoten in einem neuen Netzwerk verschmolzen werden. Hier werden die Ergebnisse der Phasen $l = 2$ und der letzten Phase $l = 5$ betrachtet. Für $l = 5$ ergab sich die höchste Modularity. Allerdings sticht hier die sehr kleine Anzahl von Communities heraus, die wiederum vergleichsweise groß sein müssen. Gegenüber dem Ergebnis der Phase 2 ergibt sich eine relativ kleine Steigerung der Modularity, die mit einem erheblichen Verlust an *Auflösung* erkauft wird³. Aus Abbildung 4.8c und 4.8d geht hervor, dass diese Reduktion der Anzahl im Wesentlichen auf das Reduzieren sehr kleiner Communities zurückgeht. Da der Algorithmus von Blondel et al. mittels einer (lokalen) Optimierung der Modularity arbeitet, könnte dieses Phänomen auf das in der Literatur beschriebene Auflösungslimit der Modularity-Funktion (bspw. [FoBa07] [GodC09]) zurückzuführen sein. Es scheint fraglich, ob die in Relation zur Größe des Graphen sehr geringe Zahl von 186 Communities die Struktur des Graphen (in Bezug auf die inhaltliche Analyse) adäquat wiedergibt.

Abbildung 4.9 illustriert dies anhand einer Community aus der Zerlegung des Algorithmus von Blondel et al. mit $l = 5$. Diese enthält klar abgegrenzte Untereinheiten,

²<http://www.tp.umu.se/~rosvall/code.html>

³Die Zerlegungen der Phasen 3 und 4 unterschieden sich nur geringfügig von der Zerlegung der Phase 5

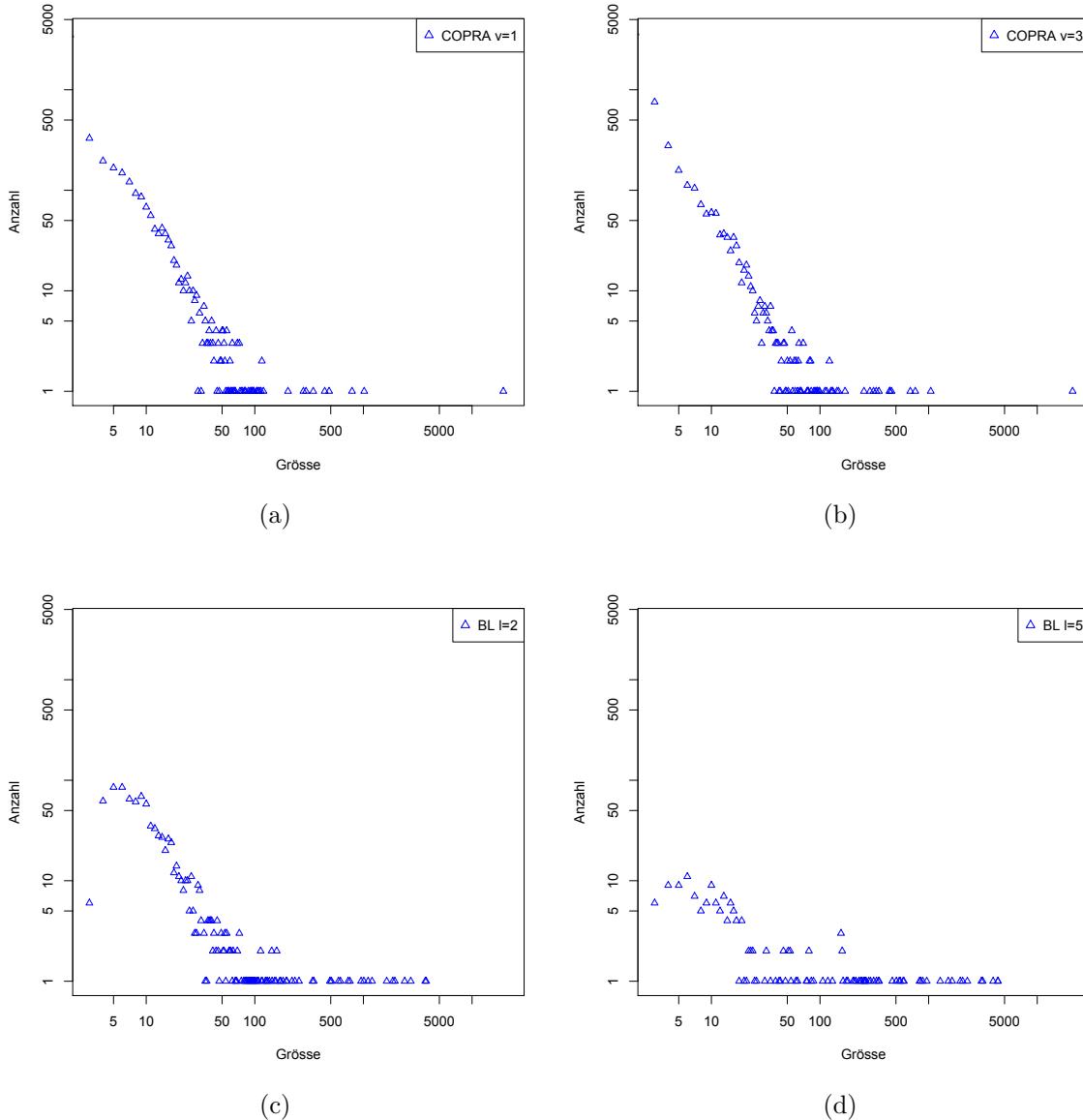


Abbildung 4.8: Verteilung der Größe der Communities

die intuitiv wieder eigenständige Communities darstellen, sich aber nicht als solche im Ergebnis wiederfinden.

Die Verteilungen der Community-Größen aus allen Berechnungen sind in einer Hinsicht konsistent: Neben einer großen Zahl von kleinen Communities gibt es eine signifikante Anzahl von größeren bis sehr großen Communities. Es scheint also keine charakteristische Größe der Communities zu geben.

Aus Tabelle 4.1 geht hervor, dass sich im Fall von Blondel et al. fast alle Knoten des Graphen in einer Community wiederfinden, die mindestens die Größe 4 hat. In Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, dass ein erheblicher Anteil der Knoten einen sehr geringen Grad von 1 oder 2 hat. Da solche Knoten mangels Kanten nicht selbst eine dichte Vernetzung herstellen können, müssen sie Mitglied in Communities sein, in denen Knoten mit höherem Grad sowohl die interne Vernetzung der Community als auch die Vernetzung der Community mit anderen erzeugen. COPRA scheint

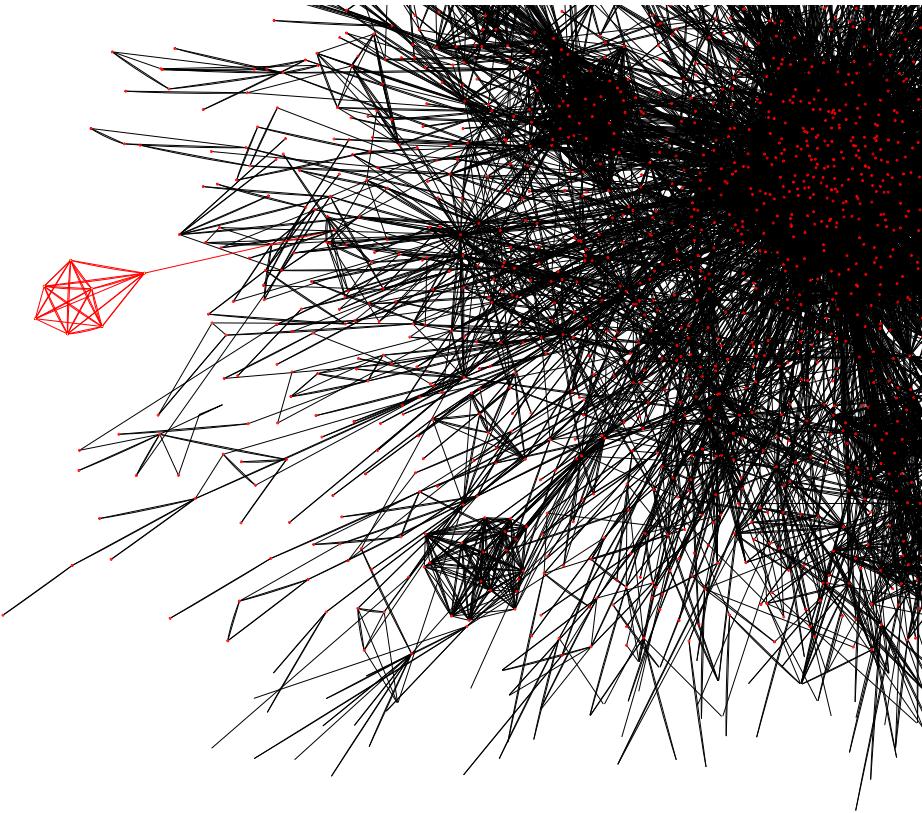


Abbildung 4.9: Community mit modularen Untereinheiten (Größe 2.271, Blondel ($l = 5$), Force-directed Layout)

hingegen dazu tendieren, deutlich mehr Knoten in Communities sehr kleiner Größe mit 3 oder weniger unterzubringen. Dieses Verhalten könnte dazu führen, dass die Aussagekraft der Zerlegung in Bezug auf die realen Communities geschwächt wird, wenn viele Knoten auf diese Art abgespalten werden.

Gegenüber der COPRA-Zerlegung mit $v = 1$ zeigt die Zerlegung mit $v = 3$ eine deutlich grössere Anzahl von Communities der Größe 3 und 4. Abgesehen davon ähneln sich die Verteilungen der Größen aber weitgehend. Beide enthalten eine charakteristische sehr große Community mit ca. 19.000 bzw. ca. 21.000 Mitgliedern. Demgegenüber bietet die Blondel-Zerlegung mit $l = 2$ eine deutlich geringere Anzahl solcher sehr kleiner Communities, dafür aber eine höhere Zahl mittlerer (mehr als 100 Mitglieder) und insbesondere eine höhere Zahl sehr großer (zwischen 500 und 5000 Mitglieder) Communities. Die beiden Algorithmen konvergieren nicht gegen ein gemeinsames Optimum, sondern liefern Ergebnisse, die sich qualitativ stark unterscheiden.

Der insgesamt recht hohe Modularity-Wert weist darauf hin, dass der Graph in der Tat eine ausgeprägte modulare Struktur hat, wie dies von einem sozialen Netzwerk erwartet wird. Newman et al. geben an, dass ein Modularity-Wert $C \geq 0.3$ in der Praxis auf eine signifikante Community-Struktur schließen lässt [CINM04].

4.3.3 Struktur der Communities

Die Abbildungen 4.10 und 4.11 zeigen die Struktur der Communities für die Zerlegungen COPRA ($v = 1$) und Blondel ($l = 2$). Auffällig ist hier insbesondere die

Algorithmus	Modularity	Communities	Enthaltene Knoten
BL ($l = 2$)	0.701	936	44.934
BL ($l = 5$)	0.710	186	44.934
COPRA ($v = 1$)	(0.780)	1.421	42.205
COPRA ($v = 3$)	(0.786)	1.354	—

Tabelle 4.1: Modularity-Werte, Anzahl der Communities mit mehr als 3 Knoten sowie die Anzahl der insgesamt in diesen Communities enthaltenen Knoten für die Algorithmen Blondel et al. (BL) in Phase 2 und 5 sowie COPRA mit $v = 1$ und $v = 3$. Die Modularity-Werte für COPRA können nicht mit denen für Blondel verglichen werden, da ihnen eine andere Modularity-Definition für überlappende Communities zugrunde liegt.

Algorithmus	TLD-S	TLD-M	SLD-S	SLD-M	SIG
BL ($l = 2$)	499 (53%)	417 (45%)	41 (4%)	254 (27%)	115 (12%)
BL ($l = 5$)	85 (47%)	85 (47%)	15 (8%)	38 (21%)	26 (14%)
COPRA ($v = 1$)	824 (58%)	564 (40%)	178 (13%)	429 (30%)	572 (40%)
COPRA ($v = 3$)	792 (58%)	525 (38%)	187 (14%)	425 (31%)	555 (41%)

Tabelle 4.2: Communities, in denen entweder 80% (TLD-S) oder 40% (TLD-M) der UserIDs in der gleichen TLD bzw. in der gleichen SLD (SLD-S/SLD-M) liegen oder in denen mindestens 80% der Signaturen innerhalb eines Monats entstanden sind (SIG).

teilweise sternförmige Struktur der COPRA-Zerlegung. Ein signifikanter Anteil der kleineren Communities ist rund um die zentrale Community der Größe ca. 19.000 angeordnet und im wesentlichen nur mit dieser vernetzt. Diese Struktur weist gewisse Ähnlichkeiten zur Struktur der starken Zusammenhangskomponenten auf (siehe Abschnitt 4.2.1). Diese sind ebenfalls sternförmig um eine zentrale Komponente angeordnet, die die Größe der anderen um mehrere Größenordnungen übertrifft. Allerdings sind im Fall der Community-Struktur noch eine Reihe mittelgroßer Communities vertreten, die dieses Muster etwas stören. Das sternförmige Muster der Zusammenhangskomponenten wiederholt sich also in etwa innerhalb der größten Zusammenhangskomponente auf einer anderen Ebene. Es könnte daher spekuliert werden, ob das Netzwerk eine *Selbstähnlichkeit* aufweist, wie sie für eine Reihe von komplexen Netzwerken gezeigt wurde [SoHM05]. Dieser Frage wurde allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter nachgegangen. Im Vergleich dazu zeigt sich in der Struktur der Blondel-Communities die etwas ausgewogenere Verteilung der Größen. Zwar sind auch hier viele kleine Communities sternförmig um die zentralen Communities angeordnet, diese verteilen sich hier aber auf mehrere solcher großen zentralen Communities.

4.3.4 Inhaltliche Analyse

Aus Tabelle 4.2 geht hervor, dass für alle Zerlegungen fast alle Communities einer Top-Level-Domain zuordenbar sind oder von einer TLD dominiert werden. Werden die generischen Top-Level-Domains (gTLD: com, org, net, info, ...) abgezogen, verbleiben im Fall von COPRA noch 519 (38%) Communities, die einer TLD (und damit einer *Country-Coded TLD (ccTLD)*) zugeordnet werden können und 315 (23%), die von einer ccTLD dominiert werden. Für die anderen Zerlegungen ergeben sich ähnliche Werte. Damit ist immerhin etwa die Hälfte der Communities einem Land zuordenbar.

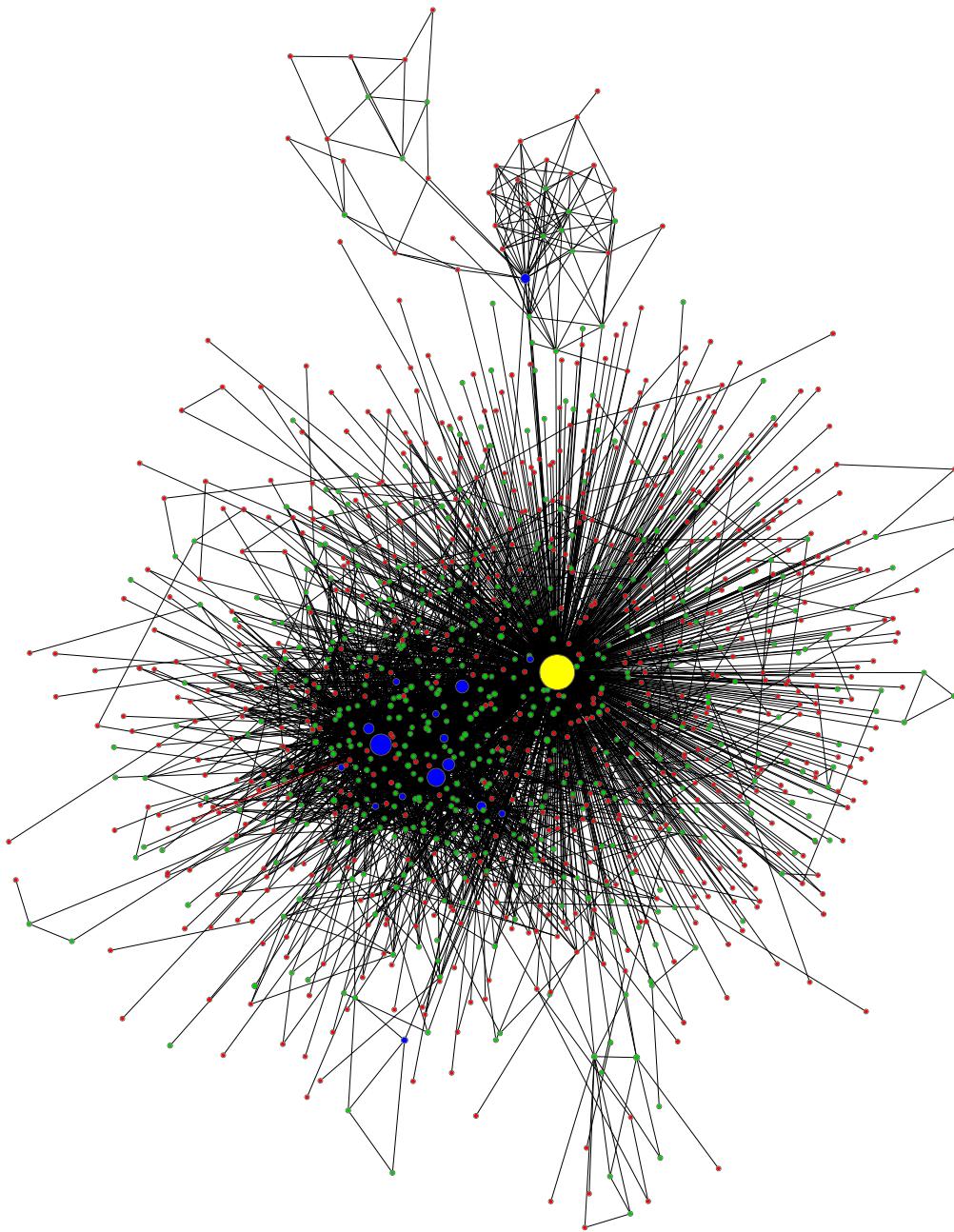


Abbildung 4.10: Struktur der Communities (COPRA ($v = 1$) (rot: Größe < 10 , grün: Größe < 100 , blau: Größe < 1000 , gelb: Größe > 1000)).

Für die von einer gTLD dominierten Communities ergeben Stichproben, dass sich die Teilnehmer der meisten dieser Communities anhand der Namen zumindest einem Sprachraum zuweisen lassen.

Dieses Ergebnis ist naheliegend. Wie in Abschnitt 3.3 dargelegt, wird davon ausgegangen, dass ein wesentlicher Faktor, der das Zustandekommen von Signaturen beeinflusst, die sozialen Kontakte einer Person sind. Es ist weiterhin naheliegend, dass sich diese sozialen Kontakte unter anderem aufgrund von Sprachbarrieren und der räumlichen Nähe hauptsächlich im Rahmen eines Landes ergeben. Beispielsweise ist für eine aus Finnland stammende Person anzunehmen, dass die Mehrzahl ihrer Freunde, Bekannten, Geschäftspartner und sonstigen Kontakte wieder Finnen sind.

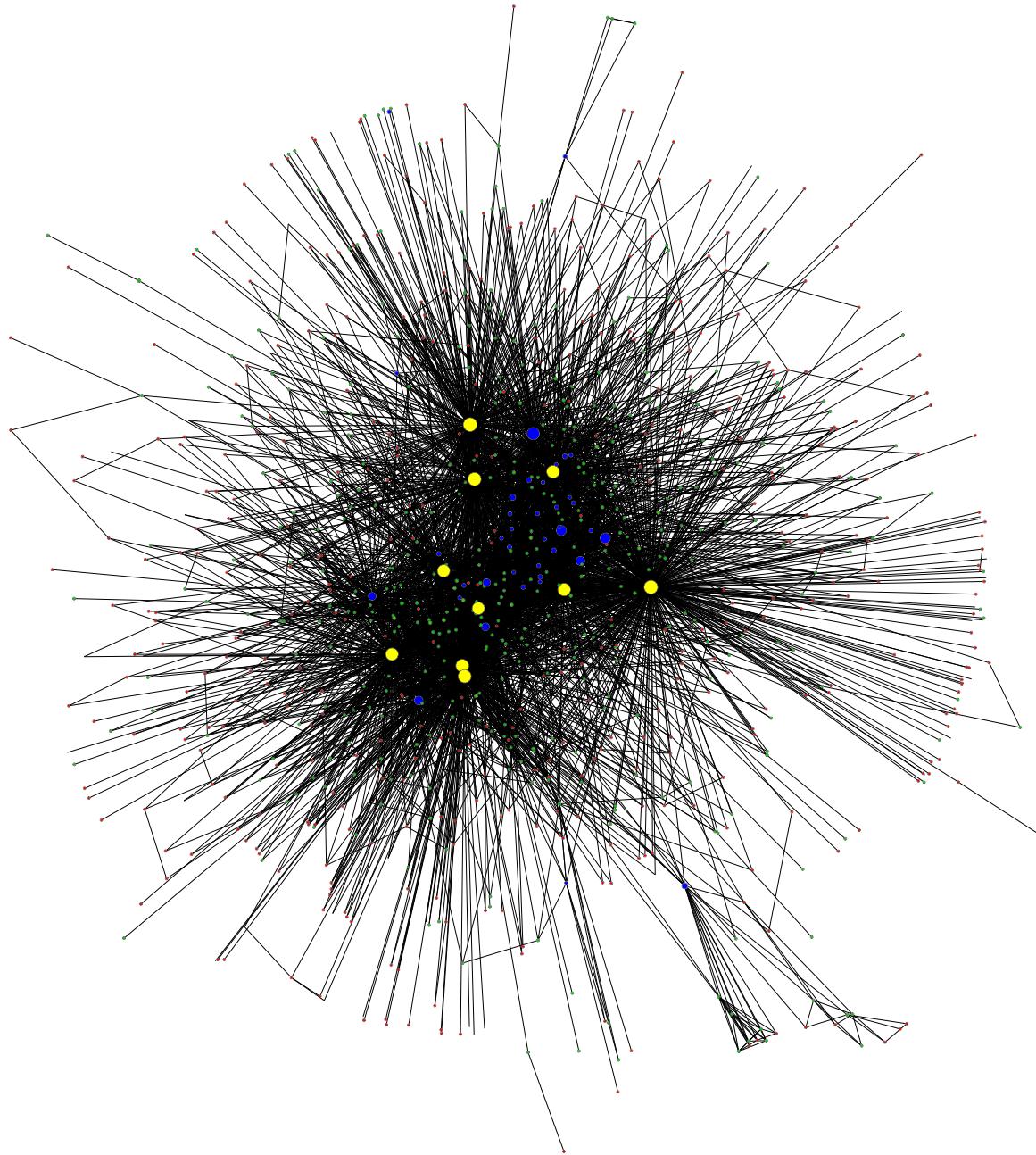


Abbildung 4.11: Struktur der Communities (Blondel $l = 5$) (Knotenfärbung wie in Abb.4.10)

Zwar könnte argumentiert werden, dass das Internet die geographische bzw. nationale Beschränkung sozialer Kontakte aufhebt. Allerdings spielt die geographische Nähe eine wichtige Rolle im Signaturprozess. Die verbreitete Prozedur für das Signieren eines Schlüssels setzt ein direktes persönliches Treffen der Signierenden voraus (siehe Abschnitt 2.2.5). Es ist anzunehmen, dass die überwiegende Mehrheit der PGP-Benutzer die meiste Zeit in einem Land und damit in einem geographisch eingegrenzten Bereich verbleibt. Damit kommen für diese Mehrheit überwiegend nur Bewohner des gleichen Landes als Signaturpartner in Frage. Als Mechanismen für die internationale Vernetzung kommen dann etwa internationale Konferenzen in Frage. Nur ein sehr kleiner Teil der PGP-Benutzer dürfte die notwendige interna-

tionale Mobilität aufweisen, so dass sich seine Signaturen nicht überwiegend einem geographischen Bereich bzw. einem Land zuweisen lassen.

Interessanter für die Fragestellung ist aber die Erkennung von Keysigning-Parties und die Zuordnung zu Second-Level-Domains. Im Vergleich der Algorithmen (Tabelle 4.2) zeigt sich zunächst, dass die COPRA-Zerlegungen bessere Resultate liefern als die Blondel-Zerlegungen, da hier mehr Communities zugeordnet werden können. Zwar entfällt bei COPRA ein großer Anteil dieser Zuordnungen auf sehr kleine Communities der Größe 3 und 4. Die Aussagekraft solcher kleiner Zuordnungen ist selbstverständlich sehr begrenzt. Werden diese abgezogen, verbleibt aber immer noch eine grösse Zahl zuordnenbarer Communities von signifikanter Größe.

Aus den absoluten Zahlen in Tabelle 4.2 und den Verteilungen der Größen in Abbildungen 4.14, 4.15 und 4.16 geht hervor, dass die überlappende Zerlegung keine wesentlichen Vorteile bringt, da nicht eine deutlich grösse Anzahl von Communities inhaltlich zugeordnet werden kann.

Im Vergleich der Blondel-Zerlegungen zeigt sich, dass das Zusammenpacken von Communities von Phase $l = 2$ zu Phase $l = 5$ und der damit verbundene Auflösungsverlust es erheblich erschwert, die Communities inhaltlich zuzuordnen. Eine Zerlegung mit höherer Modularity entspricht also nicht im Allgemeinen einer Zerlegung, die die Struktur realer Communities besser wiedergibt. Die Zerlegungen des Algorithmus von Blondel et al. scheinen insgesamt vom Auflösungslimit der Modularity-Maximierung betroffen zu sein und bieten daher nicht die notwendige Auflösung, um die Communities besser inhaltlich analysieren zu können.

Insgesamt ist eine tatsächliche Zuordnung anhand des 80%-Schwellwerts nur für sehr wenige Communities von geringer Größe möglich. Für den 40%-Schwellwert und die zeitliche Korrelation ist die Anzahl zuordnenbarer Communities deutlich höher. Auch hier entfällt allerdings die Mehrzahl auf sehr kleine Communities. Dass so gut wie keine Communities mit einer Größe über 100 zugeordnet werden können, spricht dafür, dass diese sich nicht anhand dieser einfachen Mechanismen bilden.

Die sehr große Community aus der COPRA-Zerlegung könnte vermuten lassen, dass hier relativ willkürlich Knoten zusammengepackt wurden. Allerdings hat diese Community eine Reihe von Eigenschaften, die nahe legen, dass diese Gruppierung durchaus Sinn ergibt. Von 21.157 Knoten verfügen 8.879 (42%) über eine E-Mail-Adresse in der Top-Level-Domain .de, während andere – insbesondere nicht-deutschsprachige – ccTLDs deutlich schwächer vertreten sind. Das zeigt einerseits einen überraschend hohen Anteil von deutschen oder deutschsprachigen Benutzern am Gesamtnetzwerk. Die 8.879 Schlüssel sind natürlich nur eine Untergrenze, da auch in einer Vielzahl weiterer Communities deutsche Teilnehmer vorkommen. Ein Grund für diese hohe Anzahl deutscher Schlüssel könnte in der in Abschnitt 2.2.5 erwähnten „Krypto-Kampagne“ der Zeitschrift c't liegen, die das Bewusstsein für die Notwendigkeit der Authentifizierung von Schlüsseln im deutschsprachigen Raum deutlich gesteigert haben dürfte. Andererseits lässt dies den Schluss zu, dass die enthaltenen Knoten eben nicht willkürlich zusammengepackt wurden, sondern neben ihrer topographischen Nähe auch eine „inhaltliche“ Gemeinsamkeit aufweisen. Darauf weist auch hin, dass in dieser Community eine relativ zu anderen SLDs sehr große Anzahl von Schlüsseln von Mitgliedern des Debian-Projekts enthalten ist. Diese Community enthält nicht nur knapp die Hälfte der Schlüssel, sondern mit ca. 260.000 Kanten den

Größe	SLD	Anteil
436	apache.org	48%
130	nun.org	82%
97	cert.org	70%
81	redhat.org	68%
63	purdue.edu	65%
59	cisco.com	79%

Tabelle 4.3: Die größten, von einer SLD dominierten Communities (COPRA).

Großteil der überhaupt vorhandenen Kanten. Sie ist also anscheinend intern sehr dicht vernetzt. Es scheint daher fraglich, ob sich innerhalb dieser Community wieder eine ausgeprägte Community-Struktur finden lässt.

In Tabelle 4.3 sind die 6 größten Communities aus der COPRA-Zerlegung mit Zuordnung zu Second-Level-Domains aufgeführt. Diese stammen sämtlich aus einem technologischen oder akademischen Umfeld.

4.3.5 Kriterium für KSPs

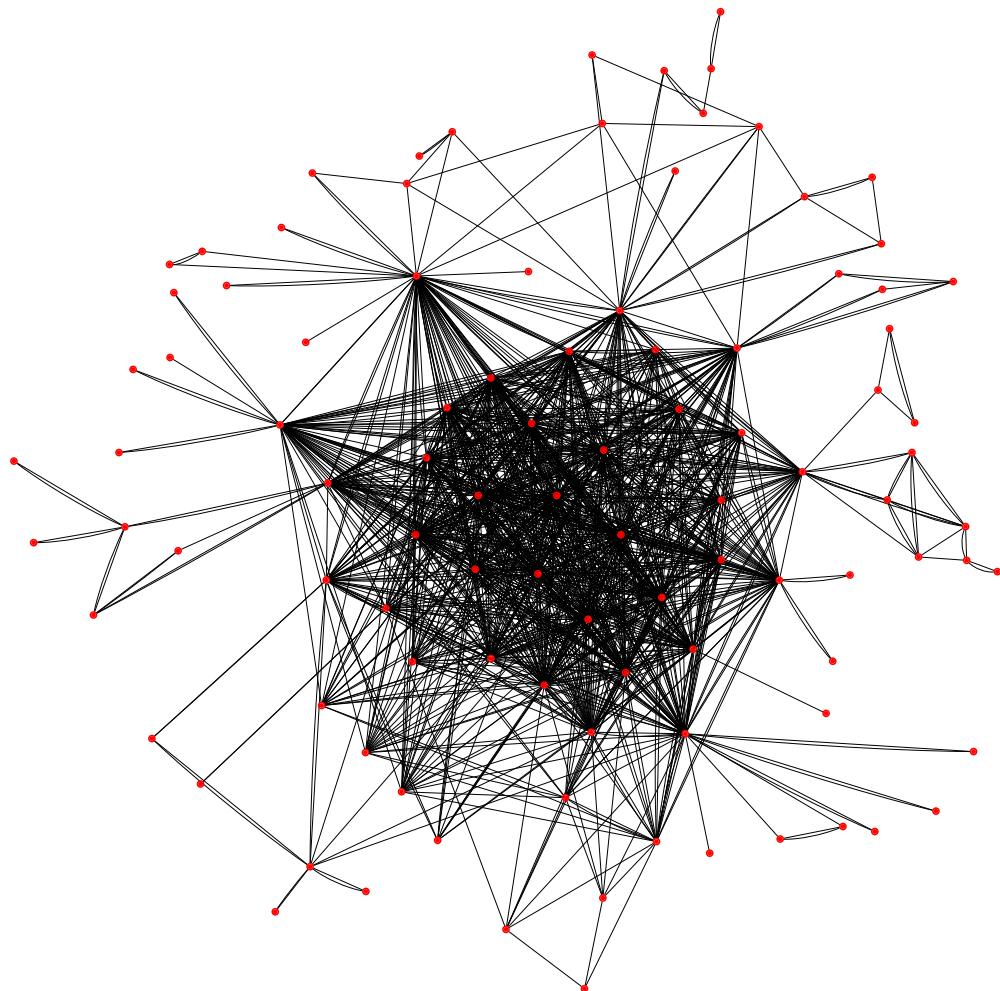


Abbildung 4.12: Community mit zeitlicher Korrelation der Signaturen (Blondel $l = 5$), 100 Knoten, 72% der Signaturen innerhalb eines Monats)

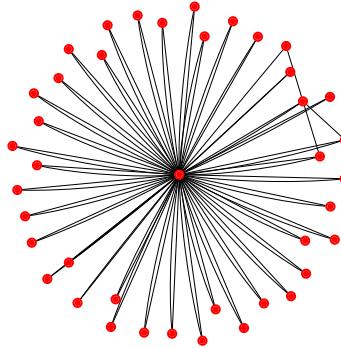


Abbildung 4.13: Community mit zeitlicher Korrelation der Signaturen (Blondel ($l = 5$), 41 Knoten, 84 % der Signaturen innerhalb eines Monats)

Es stellt sich die Frage, ob die zeitliche Korrelation der Signaturen in einer Community ein geeignetes Mittel ist, um Keysigning-Parties zu erkennen. Neben dem zeitlichen Zusammenhang der Signaturen ist ein weiteres Merkmal einer Keysigning-Party wie in Ab. 2.2.5 beschrieben, dass jeder Teilnehmer mit (fast) jedem anderem Teilnehmer Signaturen austauscht, so dass sich eine fast vollständige Vermaschung – fast eine Clique – ergibt. Eine stichprobenartige Untersuchung in den Communities zeigt, dass die meisten Communities mit zeitlicher Korrelation zumindest teilweise dieses Merkmal zeigen. Abbildung 4.12 zeigt ein Beispiel einer solchen Community. Etwa die Hälfte der Knoten ist in einer Fast-Clique enthalten, deren Knoten mit (fast) allen anderen vernetzt sind. Dieser innere Teil des Teilgraphen entspricht genau dem Bild, das als Resultat einer Keysigning-Party erwartet wird. Auch wenn dies auf die meisten der Communities mit zeitlicher Korrelation zutrifft, gibt es auch Gegenbeispiele. Abbildung 4.13 zeigt eine Community, die zwar das Kriterium der zeitlichen Korrelation erfüllt, ansonsten aber nichts mit dem erwarteten Bild einer Keysigning-Party gemein hat. Allerdings erfüllt der Teilgraph trotzdem das Kriterium der Community, da die Knoten am Rand nur Signaturen zu dem zentralen Knoten haben und damit die interne Kantendichte deutlich höher ist als die externe. Um solche Extremfälle auszuschließen, ist als zusätzliches Kriterium für die Erkennung von Keysigning-Parties ein hoher durchschnittlicher Grad der Knoten denkbar.

4.3.6 Diskussion

Diese Ergebnisse widerlegen nicht die Annahme, dass die Vernetzung im Web of Trust im wesentlichen von Keysigning-Parties und den sozialen Kontakten der Teilnehmer beeinflusst wird und damit unter anderem von Gruppenzugehörigkeit bestimmt wird. Allerdings muss festgehalten werden, dass die hier verwendeten Methoden nicht geeignet sind, um den Entstehungsmechanismus entlang dieser Annahme befriedigend zu erklären.

Ein Grund dafür ist sicherlich, dass die Struktur des Web of Trust nur zu einem bestimmten, festen Zeitpunkt betrachtet wurde. Um die Entstehungsdynamik zu verstehen, könnte alternativ die Entwicklung des Netzwerks tatsächlich über die Zeit nachvollzogen werden. Das Keyserver-Netzwerk speichert nicht nur den momentanen Zustand des Netzwerks, sondern implizit auch den Entstehungszeitpunkt jedes Schlüssels und jeder Signatur. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software speichert diese Zeitstempel in einer Datenbank und macht so die gesamte Entwicklungs geschichte des Web of Trust verfügbar (siehe Abschnitt 3.1). Anhand dieser Daten

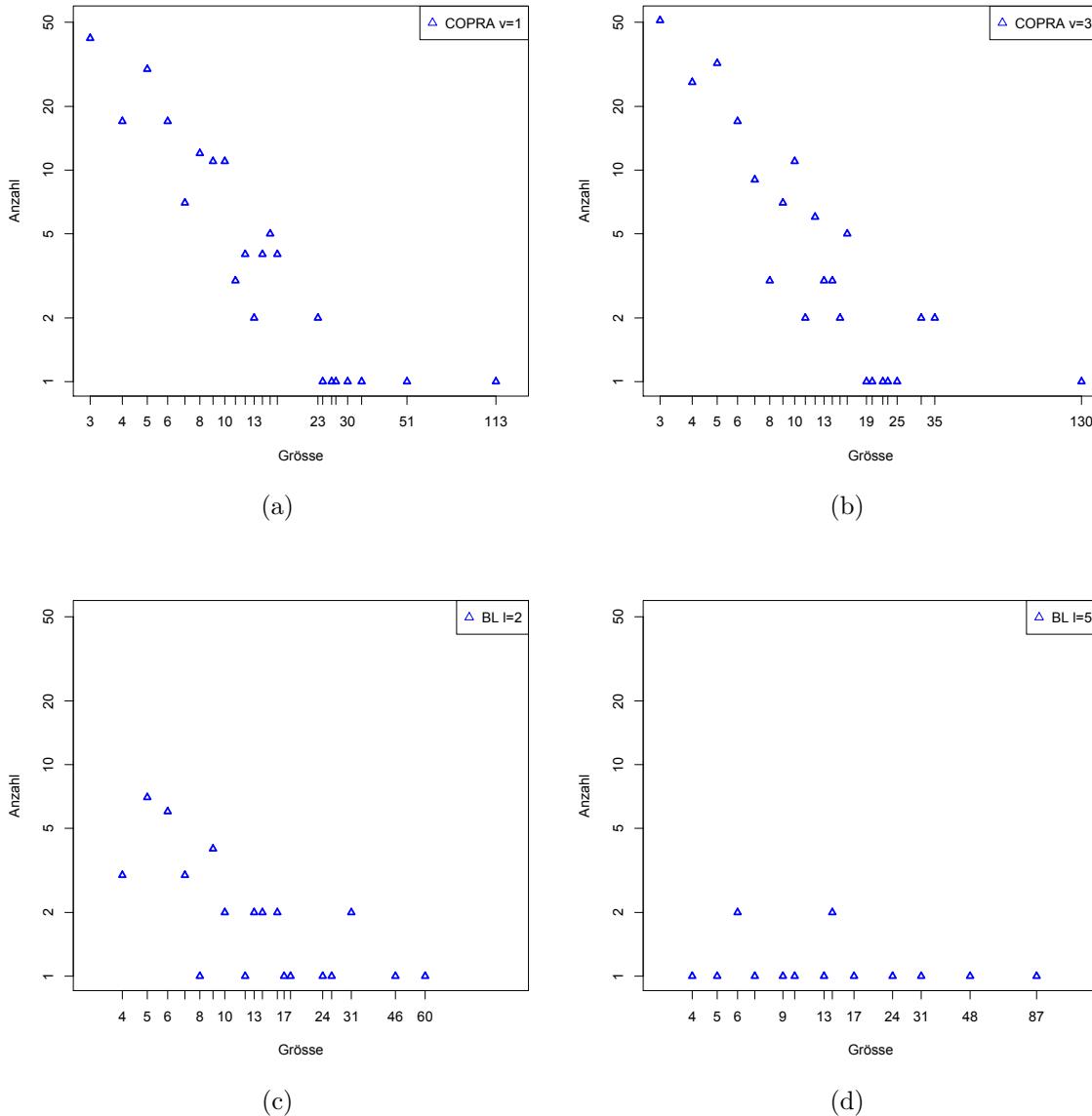


Abbildung 4.14: Zuweisung von Domains zu SLDs abhängig von der Community-Größe.

könnte nachvollzogen werden, wie und in welcher Form die Communities tatsächlich entstehen und sich entwickeln.

Dass nur sehr wenige größere Communities mit zeitlicher Korrelation der Signaturen gefunden wurden, obwohl regelmäßig größere Keysigning-Parties stattfinden (siehe Abschnitt 2.2.5) ist bei näherer Betrachtung durchaus plausibel. Dass eine Keysigning-Party sich in der Struktur markant abhebt, setzt voraus, dass ihre Teilnehmer außer der Teilnahme an dieser Party keine wesentliche Signaturaktivität starten. Würden sie weiterhin an Signaturaktivitäten teilnehmen, würde die Struktur der Keysigning-Party mit der Zeit durch Signaturen von und zu Nicht-Teilnehmern „verwischt“ werden. Aufgefunden wurden also vermutlich nur die Keysigning-Parties mit einer Mehrheit von insgesamt eher inaktiven Teilnehmern. Gleiches kann für Teilnehmer angenommen werden, die sich anhand von Gruppenzugehörigkeit vernetzen. Auch hier würde die Struktur mit der Zeit „unschärfer“ werden, wenn ihre

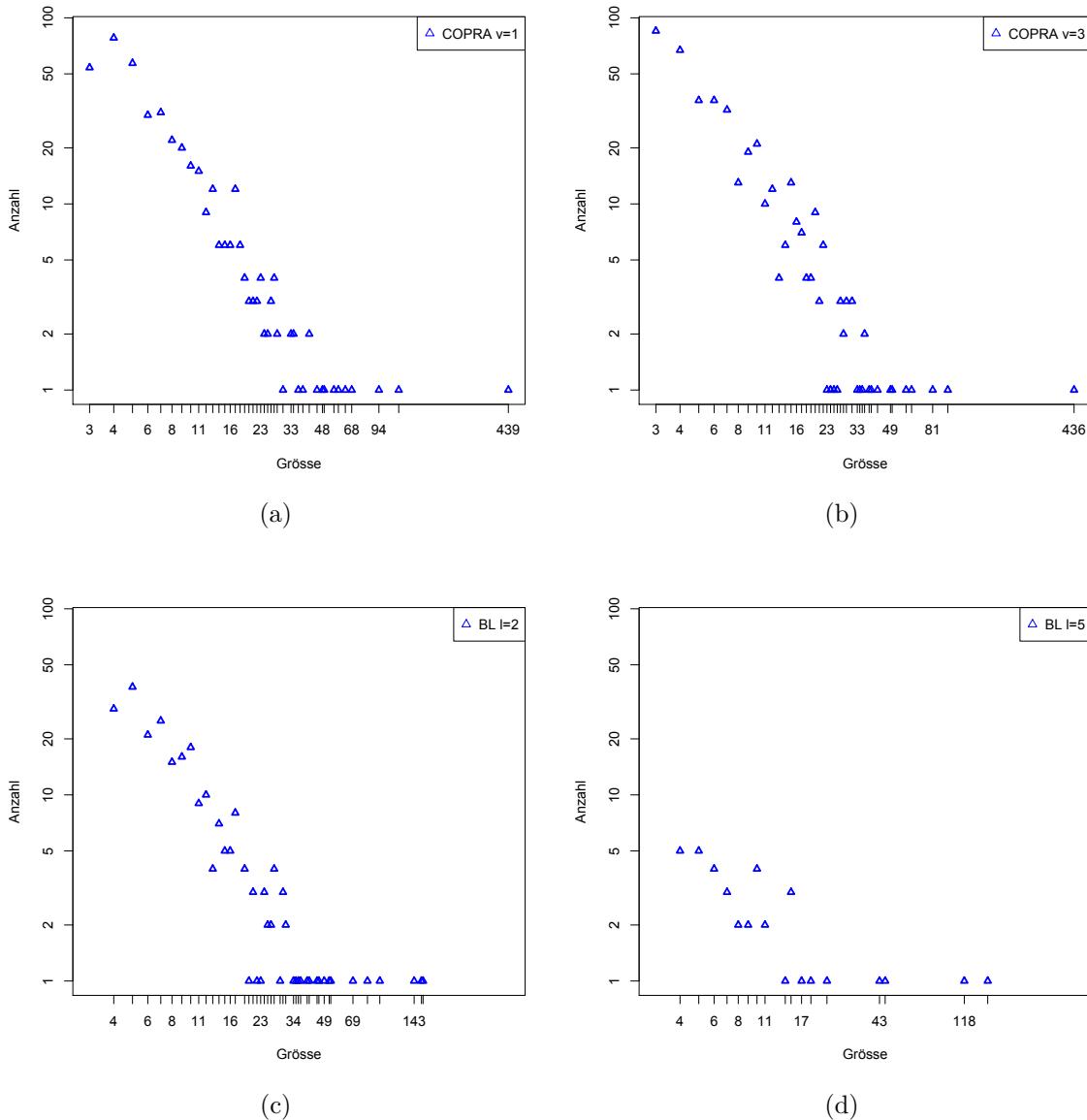


Abbildung 4.15: Verteilung der Größe der von einer SLD dominierten Communities.

Mitglieder weiterhin Signierungen vornehmen würden. Es kann also angenommen werden, dass die kleineren und insbesondere die klar zuordnbaren Communities tendenziell Teilnehmer enthalten, die in Bezug auf die Teilnahme am Web of Trust eher inaktiv sind. Um diese Vermutung zu bestätigen oder zu widerlegen, könnte das Signaturverhalten der Teilnehmer über die Zeit mit ihrer Community-Mitgliedschaft verglichen und korreliert werden.

Es scheint unrealistisch, dass die Mitgliedschaft in einer Gruppe – etwa einer Firma, akademischen Einrichtung oder einem Open-Source-Projekt – die sozialen Kontakte einer Person vollständig charakterisiert. Daneben kann eine Person noch ein weites Netzwerk an Freunden oder Bekannten haben, die diese Mitgliedschaft nicht teilen. Trotzdem können sich zu ihnen Signaturen ergeben, die einen wesentlichen Teil der Signaturen dieser Person ausmachen können. Außerdem ist anzunehmen, dass eine Vielzahl solcher Gruppen nicht über eine gemeinsame Domain verfügen, und damit mit den hier vorliegenden Daten schlicht nicht sichtbar sind. Zwar wurde versucht,

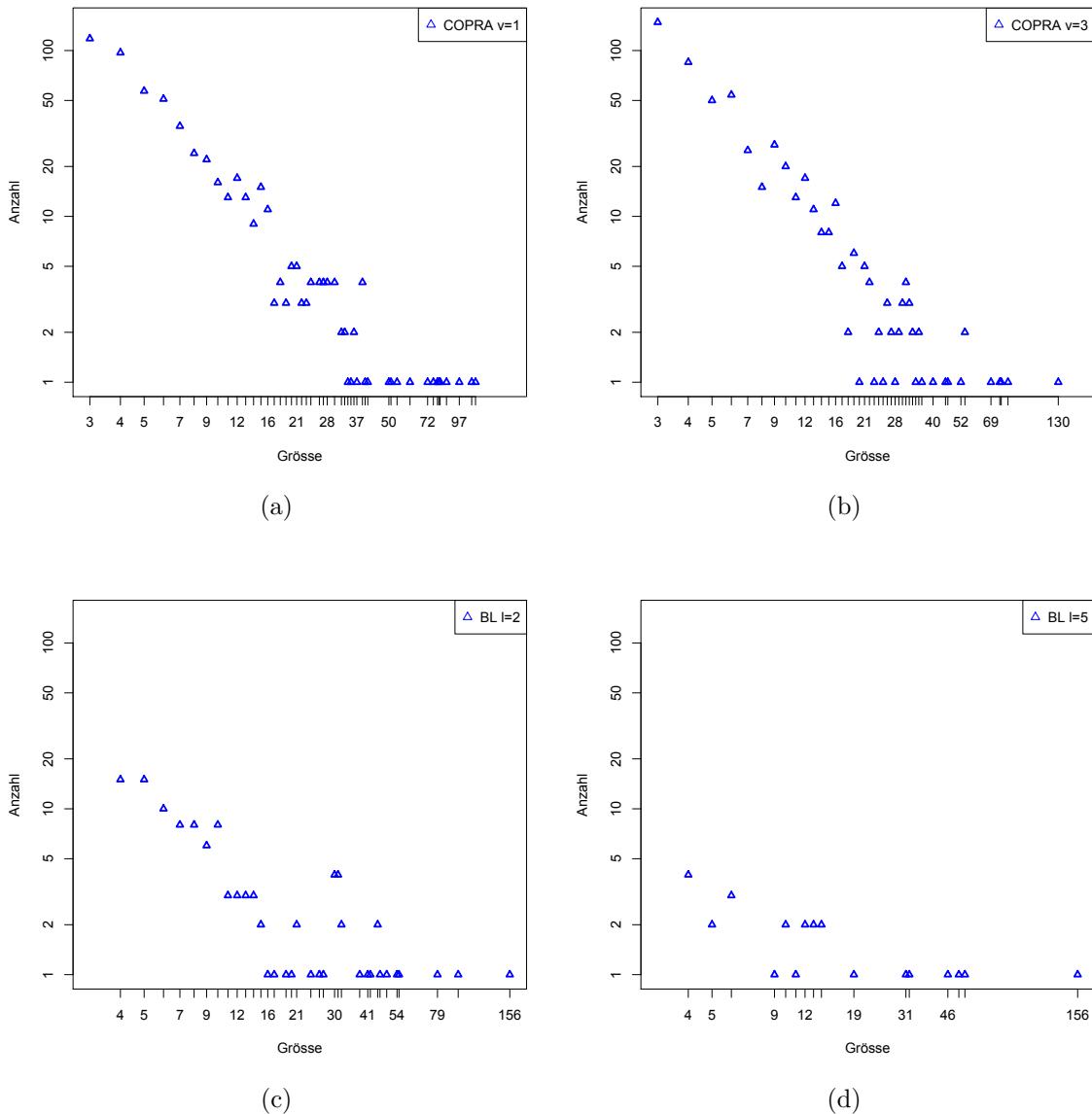


Abbildung 4.16: Verteilung der Größe von Communities mit zeitlicher Korrelation der Signaturen.

der anzunehmenden Komplexität der Gruppenzugehörigkeiten durch überlappende Communities zu begegnen. Allerdings konnte der verwendete Algorithmus keine signifikanten Überlappungseigenschaften liefern. Die Frage, inwiefern sich die einzelnen Communities sozialen Gruppen zuordnen lassen, konnte also nur unvollständig beantwortet werden.

Es zeigt sich, dass dem Web of Trust kein einzelner, einfacher Entstehungsmechanismus der hier angenommenen Form zugrunde liegt. Es kann nur unzureichend beschrieben werden als eine Ansammlung von einzelnen, einfach entstandenen Bausteinen, als die hier Communities angenommen wurden. Implizit vorausgesetzt wird dabei auch, dass diese zum Beispiel im Fall einer Keysigning-Party nach ihrer Entstehung keine wesentliche weitere Vernetzungsaktivität zeigen. Zwar trifft dies für einen Teil der Communities – gerade die, die eine zeitliche Korrelation der Signaturen zeigen oder einer Second-Level-Domain zugeordnet werden können – durchaus zu.

Für einen erheblichen Anteil der Teilnehmer – beispielsweise die Mitglieder der sehr großen Community aus der COPRA-Berechnung – scheint die Vernetzung jedoch so vielfältig zu sein, dass solche einfachen Mechanismen nicht mehr sichtbar sind und „in der Masse verschwinden“. Bei der COPRA-Zerlegung ist es etwa naheliegend, dass die sehr große zentrale Community die Mehrzahl der aktiveren Teilnehmer enthält. Hier ergibt sich eine Ähnlichkeit zur Struktur der Zusammenhangskomponenten, bei denen die größte alle einigermaßen aktiven Teilnehmer zu enthalten scheint (siehe Abschnitt 4.2.1).

Diese Punkte können anhand des Beispiels von Debian illustriert werden: Das Debian-Projekt als tatsächliche Community, in der PGP und das Web of Trust eine besonders wichtige Rolle spielen (siehe Abschnitt 2.2.5) findet sich in den Zerlegungen nicht als eigene abgegrenzte Einheit wieder. Statt dessen finden sich sehr große Communities, in denen Debian-Entwickler einen signifikanten Anteil der Schlüssel stellen. Im Fall der COPRA-Zerlegung ist dies die bereits erwähnte Community mit ca. 21.000 Mitgliedern. Von diesen verfügen 1.247 über eine E-Mail-Adresse in der Domain debian.org und sind damit offensichtlich Mitglieder des Debian-Projekts. Daneben finden sich Mitglieder des Debian-Projekts in einer Vielzahl von kleineren Communities aller Größen. Die Mitgliedschaft im Debian-Projekt scheint hier also für die Vernetzung keine so wesentliche Rolle zu spielen, dass sie die Struktur dieser real existierenden Community im Web of Trust wieder spiegelt. Selbst wenn viele Debian-Entwickler mit vielen anderen Projektmitgliedern vernetzt sind, so verfügen sie offensichtlich über genügend andere Kontakte, so dass die sich aus den projektinternen Kontakten ergebende Struktur nicht mehr sichtbar ist.

4.4 Zeitliche Entwicklung des Schlüsselbestandes

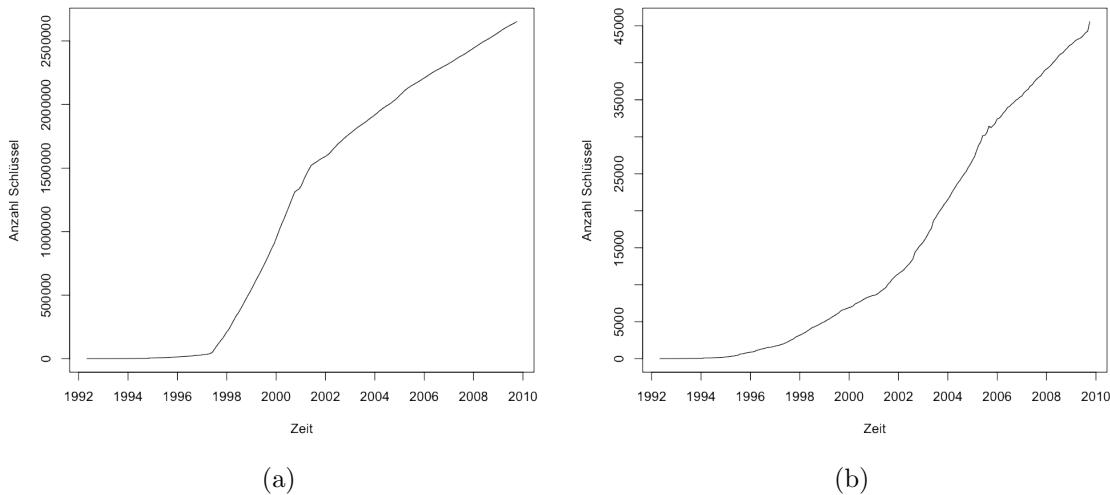


Abbildung 4.17: Zeitliche Entwicklung der Größe des gesamten Schlüsselbestandes (a) und der größten starken Zusammenhangskomponente (b)

Da die verwendete Datenbank alle jemals auf einen Keyserver geladenen Schlüssel enthält, ist es möglich, den Zustand des Schlüsselbestandes zu einem beliebigen Zeitpunkt zu berechnen. In Abbildung 4.17a wird die Entwicklung der Größe des gesamten Schlüsselbestandes und in 4.17b die Entwicklung der Größe der größten

starken Zusammenhangskomponente dargestellt. Als Beginn wurde das Jahr 1991 gewählt, da in diesem Jahr die erste Version von PGP vorgestellt wurde (siehe Abschnitt 2.2). Sowohl der gesamte Schlüsselbestand als auch die größte starke Zusammenhangskomponente zeigen nennenswertes Wachstum erst etwa ab dem Jahr 1997. Dieser Zeitpunkt korreliert unter anderem mit der Gründung des Unternehmens *PGP Inc.*, der Veröffentlichung einer neuen Version 5 der PGP-Software und in Deutschland dem Start der bereits erwähnten „Krypto-Kampagne“. Gründe für das deutlich langsamere Wachstum des gesamten Schlüsselbestandes etwa ab dem Jahr 2001 und der größten starken Zusammenhangskomponente mit einer Verzögerung etwa ab dem Jahr 2005 sind nicht bekannt. Es kann aber spekuliert werden, dass die Zielgruppe, in der sich PGP/GnuPG primär verbreitet, begrenzt ist (Anwender und Entwickler von freier Software, Sicherheitsexperten, politische Aktivisten) und in dieser Zielgruppe eine gewisse Sättigung eingetreten ist. Ebenfalls möglich ist eine zunehmende Verbreitung von auf X.509 basierenden S/MIME-Zertifikaten.

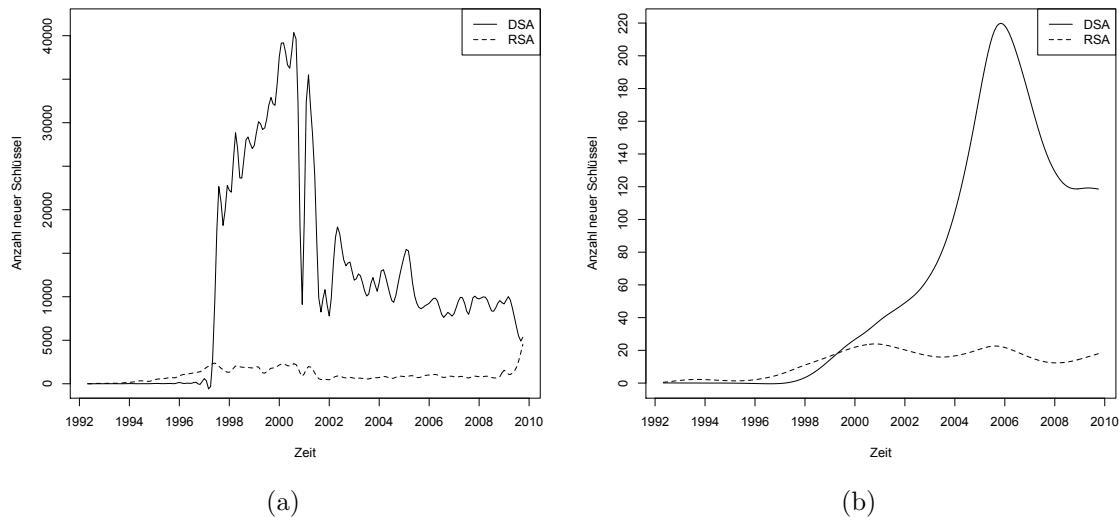


Abbildung 4.18: Rate neuer PGP-Schlüssele, die RSA oder DSA benutzen, für den gesamten Schlüsselbestand (a) und die größte starke Zusammenhangskomponente (b) in monatlichen Abständen

Abbildung 4.17 zeigt die Rate neuer Schlüssele, abhängig von dem verwendeten Public-Key-Algorithmus. Die DSA-Schlüssele⁴ machen zu jedem Zeitpunkt den größten Anteil aus. Ihre Entwicklung spiegelt im Wesentlichen die Entwicklung der Größe insgesamt aus Abbildung 4.17 wieder. Demgegenüber ist die Zuwachsrate von RSA-Schlüssele bis zum Jahr 2008 konstant niedrig. Der Grund dafür ist vermutlich, dass die PGP-Implementierungen in diesem Zeitraum in der Standardeinstellung DSA-Schlüssele erzeugten, was wiederum unter anderem in dem bis ins Jahr 2000 bestehenden Patentschutz des RSA-Algorithmus begründet ist. Die Rate neuer DSA-Schlüssele sinkt ab dem Jahr 2009 deutlich ab, während die Rate neuer RSA-Schlüssele gleichzeitig deutlich ansteigt. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass seit dem Jahr 2009

⁴Mit DSA-Schlüssele sind hier öffentliche OpenPGP-Schlüssele gemeint, deren Public-Key-Paket DSA-Schlüsselmaterial enthält. Da DSA nicht zur Verschlüsselung benutzt werden kann, enthalten diese Schlüssele noch einen Unterschlüssel mit ElGamal-Schlüsselmaterial, der zum Verschlüsseln benutzt wird.

neue Schlüssel, die mit GnuPG erzeugt werden, in der Standardeinstellung RSA statt DSA verwenden. Diese Umstellung wurde in der Entwicklerversion von GnuPG am 17.05.2009⁵ aufgrund von Berichten über verbesserte Angriffe auf die Hashfunktion SHA1 [McHP09], auf der DSA basiert, vorgenommen. Warum diese Entwicklung nicht ebenfalls in der größten starken Zusammenhangskomponente sichtbar ist, ist nicht klar. Möglicherweise liegt dies daran, dass für die Aufnahme in diese Teilmenge nicht nur das Erzeugen eines Schlüssels, sondern auch zusätzliche Aktivität in Form der Vernetzung mit anderen Schlüsseln notwendig ist. Neue Schlüssel werden also vermutlich im Allgemeinen nicht sofort in die Zusammenhangskomponente aufgenommen, sondern erst mit einiger Verzögerung. Die Zusammenhangskomponente dürfte also etwas „träger“ auf Veränderungen reagieren.

4.5 Verwendung von Public-Key- und Hashalgorithmen

Algorithmus	Anzahl	Algorithmus	Anzahl
Signaturen gesamt	446.325	Schlüssel gesamt	44.952
MD5	41.700	RSA-512	203
SHA1	398.849	RSA-768	257
RIPE-MD/160	122	RSA-1024	3.903
SHA256	5.031	RSA-2048	2.408
SHA512	2.472	RSA-3072	96
SHA224	532	RSA-4096	1.198
		DSA	36.555

(a)

Cert Level	Anzahl
Signaturen gesamt	446.325
Generic	299.518
Persona	904
Casual	28.718
Positive	119.575

(b)

(c)

Tabelle 4.4: Verwendung von Hashalgorithmen (a), Public-Key-Algorithmen (b) und certification levels (c) in der grössten starken Zusammenhangskomponente

In Tabelle 4.4b sind schlussendlich noch einige Statistiken über Eigenschaften einzelner Schlüssel aufgeführt.

Die einzelnen „certification level“ (siehe Abschnitt 2.2.3) werden durchaus verwendet (Tabelle 4.4c). Zwar ist die Mehrheit der Signaturen mit dem Standardwert „Generic“ versehen, der keine weitere Aussage macht. Allerdings verfügen über 25% der Signaturen über den höchsten Wert „Positive“. Da die Level keine im Standard festgelegte klare Semantik haben, ist die Aussagekraft dieser Werte natürlich begrenzt. Sie können aber zumindest dahingehend interpretiert werden, dass *mindestens* die Personen, die von „Generic“ abweichende Werte vergeben, den Signaturprozess durchaus ernst nehmen.

Wie zu erwarten basiert die große Mehrheit der Signaturen in der größten starken Zusammenhangskomponente auf SHA1. Neben einzelnen Signaturen mit Vertretern

⁵<http://lists.gnupg.org/pipermail/gnupg-devel/2009-May/025079.html>

der SHA2-Familie findet sich aber auch noch eine überraschend hohe Anzahl von MD5-Signaturen: 41.700 Signaturen, d.h. 10% basieren auf MD5. Die Sicherheit von MD5 muss inzwischen als ernsthaft kompromittiert eingestuft werden. 2008 gelang es einer Gruppe, durch eine Chosen-Prefix-Kollision ein von einer kommerziellen CA signiertes „bösertiges“ Certification-Authority-Zertifikat für SSL zu erhalten [SSAL⁺09]. GnuPG warnt zwar vor der Verwendung von MD5-Signaturen, erlaubt ihre Verwendung aber noch. Die Bedeutung der MD5-Signaturen für den Zusammenhalt der größten Komponente ist nicht unwesentlich: Werden diese Signaturen entfernt, reduziert sich die Größe der Komponente auf 37.599 Schlüssel, d.h. es werden ca. 8.000 Schlüssel abgetrennt.

RSA-Schlüssel mit einer Länge von höchstens 768 Bit und weniger müssen ebenfalls als praktikabel brechbar betrachtet werden. Dies wurde durch die Faktorisierung der Zahl RSA-768 demonstriert [KAFL⁺10]. Kleinjung et al. schätzen den Zeitrahmen bis zur Faktorisierung einer 1024-Bit-Zahl innerhalb eines *akademischen Rahmens* auf 5 bis 10 Jahre. Die Menge der in der größten Komponente vorhandenen RSA-Schlüssel mit 512 bzw. 768 Bit ist mit insgesamt 450 Schlüsseln gering. Ihre Entfernung trennt nur etwa weitere 300 Knoten von der Komponente ab. Die Anzahl von RSA-Schlüsseln mit 1024 Bit ist aber deutlich größer. Die Entfernung aller ca. 4.500 RSA-Schlüssel, deren Länge höchstens 1024 Bit beträgt, reduziert die Größe der Komponente um insgesamt ca. 8.500 Knoten, trennt also weitere 4.000 Knoten vom Netz ab. Es ist anzunehmen, dass sich die durchschnittlichen Distanzen ebenfalls erhöhen. Da die Standardisierungsorganisation *National Institute of Standards and Technology* eine Abkehr von RSA-1024 ab dem Jahr 2010 empfiehlt [BBBP⁺07] und praktikable Angriffe wohl nur eine Frage weniger Jahre sind, ist damit wie durch die MD5-Signaturen eine erhebliche Beeinträchtigung der größten Komponente absehbar.

Es ist zu erwarten, dass sich durch die Umstellung der Standardeinstellung in GnuPG der Anteil von RSA-Schlüsseln mit einer Länge von mindestens 2048 bit in nächster Zeit deutlich erhöht.

4.6 Verwandte Arbeiten

An dieser Stelle wird nur auf Arbeiten eingegangen, die sich mit der Netzwerkstruktur des Web of Trust bei PGP beschäftigen. Für einen Überblick über Arbeiten zur Struktur von anderen Netzwerken sei auf [Newm03] und für Arbeiten zur Community-Struktur von anderen Netzwerken auf [Fort10] verwiesen.

Capkun et al. [CaBH02] untersuchten strukturelle Aspekte der größten starken Zusammenhangskomponente eines PGP-Netzwerkes aus dem Jahr 2001. Dieses Netzwerk zeigte eine geringe charakteristische Distanz und einen hohen Clustering-Koeffizienten. Außerdem stimmte die Verteilung der aus- und eingehenden Grade mit einem Power-Law überein. Die Autoren argumentieren, dass Netzwerke, die aus Zertifikatsbeziehungen entstehen, naturgemäß den Small-World-Effekt zeigen, da sich die Zertifikate anhand schon bestehender Vertrauensbeziehungen ergeben. Die Autoren geben außerdem noch ein Netzwerkmodell an, das Graphen erzeugen soll, die in den beschriebenen Charakteristiken dem PGP-Netzwerk ähneln.

Arenas et al. [BnPSDGA04] analysierten ein PGP-Netzwerk aus dem gleichen Jahr. Das Netzwerk wurde von vornherein in ein ungerichtetes Netzwerk umgewandelt,

indem nicht gegenseitige Kanten entfernt wurden. Sie betrachteten die Gradverteilung, den Clustering-Koeffizienten und die Korrelation von Graden benachbarter Knoten. Dabei folgt die Verteilung der Knotengrade einem Power-Law. Der Clustering-Koeffizient des Netzwerkes beträgt $C = 0.4$, ist also recht hoch. Die Grade benachbarter Knoten sind positiv korreliert. Außerdem benutzten die Autoren den Algorithmus von Girvan und Newman [NeGi04], um eine Community-Zerlegung des Netzwerks zu berechnen. Die Verteilung der Größe dieser Communities folgt wieder einem Power-Law.

Warren et al. betrachteten das Netzwerk nicht zu einem festen Zeitpunkt sondern untersuchten die *Dynamik* des Netzwerks [WaWW07]. Sie berechneten verschiedene grundlegende Netzwerkeigenschaften (Größe des Netzwerkes, Distanzen, Gradverteilung etc.) und verfolgten deren Entwicklung *über die Zeit*. Ihre Ergebnisse können allerdings mit den in dieser Arbeit präsentierten nicht sinnvoll verglichen werden, da der Graph von Schlüsseln auf Individuen reduziert wurde (siehe auch Abschnitt 3.2).

Gemein ist diesen akademischen Arbeiten, dass sie auf deutlich älteren Datensätzen beruhen. Insbesondere bei [CaBH02] und [BnPSDGA04] kamen Daten aus dem Jahr 2001 zum Einsatz. Seither hat sich die MSCC von ca. 12.000 auf ca. 45.000 Knoten vergrößert. Bei einer Veränderung dieses Ausmaßes kann nicht von vornherein ausgeschlossen werden, dass sich grundlegende Merkmale des Netzwerks verändert haben. Schon aus diesem Grund scheint es berechtigt, dass in dieser Arbeit Merkmale untersucht wurden, die auch schon in frühen Arbeiten betrachtet wurden. Außerdem wurde diese Arbeit in Bezug auf die untersuchten Merkmale deutlich breiter angelegt.

Neben diesen akademischen Arbeiten gibt es mehrere Ansätze aus der PGP-Community, die Netzwerkstruktur zu untersuchen. Das wotsap-Projekt [Cede] stellt einen täglich aktualisierten Datensatz bereit, der die Vernetzungsstruktur der größten starken Zusammenhangskomponente des Web of Trust darstellt. Diese Daten werden für eine Webapplikation benutzt, die kürzeste Pfade zwischen Schlüsseln berechnet und visualisiert und so bei der Nutzung von Zertifikatspfaden behilflich sein soll. In Abschnitt 3.1.1 wird der Wotsap-Datensatz näher betrachtet und begründet, warum er in dieser Arbeit nicht verwendet wurde.

Henk P. Penning berechnet anhand der Wotsap-Daten regelmäßig strukturelle Eigenschaften des Web of Trust bzw. von dessen größter starker Zusammenhangskomponente [Penn]. Dies beinhaltet die Entwicklung der Größe dieser Komponente und der durchschnittlichen Distanzen über die Zeit, die Verteilung der Knotengrade und die Verteilung durchschnittlicher Distanzen pro Knoten. Außerdem wird die Robustheit des Netzwerkes bei der Entfernung von zufällig ausgewählten bzw. besonders gut vernetzten Knoten simuliert.

In allen Arbeiten zeigen die betrachteten Netzwerke konsistente Eigenschaften, die auch mit den Ergebnissen dieser Arbeit übereinstimmen. Dies sind im wesentlichen die charakteristischen Merkmale eines sozialen Netzwerks: Eine niedrige charakteristische Distanz, ein hohes Ausmaß an Clustering und eine prägnante Zusammenballung von Knoten in Communities. Außerdem ähneln sich die Verteilungen der Knoten insofern, als sie einer Power-Law-Verteilung zumindest *ähneln*. Diese grundlegenden Merkmale haben sich also trotz des deutlichen Wachstums der Knotenzahl qualitativ nicht verändert.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden einige Aspekte des OpenPGP Web of Trust untersucht, wobei der Fokus auf der Struktur des sich daraus ergebenden Netzwerks lag. Auch wenn bereits einige Arbeiten zur Struktur des Web of Trust veröffentlicht wurden, wurden hier Aspekte untersucht, die dort keine Beachtung fanden. Außerdem wurde hier der *aktuelle* Stand des Netzwerks untersucht, dessen Größe sich im Vergleich mit dem Stand der Literatur deutlich verändert hat.

Es wurde eine Software vorgestellt, die aus der Datenbank eines Keyservers die Struktur des Zertifikatsgraphen extrahiert. Im Unterschied zu Wotsap beschränkt sich der Datensatz nicht auf die größte starke Zusammenhangskomponente, sondern enthält alle gültigen Schlüssel. Auch die zeitliche Entwicklung ist sichtbar, da Entstehungs-, Ablauf- und Widerrufszeitpunkte enthalten sind. Zusätzlich sind weitere Informationen über die Schlüssel enthalten, die weitergehende Analysen ermöglichen.

Dieser Datensatz wurde benutzt, um die Struktur des Web of Trust auf mehreren Ebenen zu untersuchen. Es wurde gezeigt, dass die Mehrzahl der vorhandenen Schlüssel kaum vernetzt ist. Auch der Vernetzungsgrad des Großteils der restlichen Knoten ist so gering, dass die sich dort ergebenden Komponenten von trivialer Grösse sind. Der Großteil der vorhandenen Signaturen konzentriert sich auf eine zentrale Komponente von 45.000 Schlüsseln. Bei dieser Komponente scheint es sich also um den einzigen aktiven und nennenwert vernetzten Teil der Schlüssel zu handeln.

Es wurde argumentiert, dass der Zertifikatsgraph Elemente eines sozialen Netzwerks aufweist. In der Tat zeigt die zentrale Komponente Eigenschaften, die typisch für soziale Netzwerke sind: den Small-World-Effekt, ein hohes Mass an Clustering, eine Korrelation zwischen dem Grad von Knoten und eine ausgeprägte Community-Struktur. Dadurch wird die Annahme gestützt, dass sich die *Signaturbeziehungen* auf dem Substrat *sozialer Beziehungen* bilden.

Die zentrale Komponente zeigt außerdem eine Gradverteilung mit hoher Variabilität, die einem Power-Law ähnelt. Im Unterschied zu skalenfreien Netzwerken wird der Zusammenhang dieser Komponente aber nicht fundamental durch wenige stark vernetzte Hubs bestimmt. Das Netzwerk zeigt sich im Gegenteil recht robust bei

einer gezielten Entfernung der am besten vernetzten Knoten. Sein Zusammenhang scheint nicht von der Existenz einiger weniger „Hubs“ abzuhängen. Dadurch wird auch illustriert, dass längst nicht jedes Netzwerk, dessen Gradverteilung einem Power-Law ähnelt, diese Eigenschaft aufweist. Dass sich das Netzwerk bei der Entfernung zufälliger Knoten wie erwartet sehr robust zeigt, aber eben auch bei der gezielten Entfernung gut vernetzter Knoten recht stabil bleibt, ist insbesondere für seine konkrete Funktion relevant: Das durchaus natürliche Verschwinden von Knoten aus dem Netz durch Kompromittierung, Ablaufen etc. scheint seine Funktion auf den ersten Blick kaum zu beeinträchtigen. Ein Angriff auf die Netzwerkstruktur als Form eines Denial of Service-Angriffs durch die Entfernung einzelner Schlüssel scheint nicht praktikabel.

Es wurde versucht, die Auswirkung von Fortschritten in Angriffen auf kryptographische Methoden für das Netzwerk abzuschätzen. Direkt absehbare Probleme mit MD5, SHA1 und RSA-Schlüsseln geringer Länge werden den Zusammenhalt des Netzwerks nicht fundamental beeinflussen, aber eine Reihe von selbst nicht betroffenen Schlüsseln von diesem abtrennen.

Interessant wäre hier allerdings noch eine Betrachtung der Distanzen im Netzwerk bei der Entfernung von Schlüsseln, da eine Erhöhung der durchschnittlichen Distanzen die Benutzbarkeit des Netzwerks deutlich beschränken könnte. Auch ist nicht klar, ob die Knoten mit den höchsten Graden tatsächlich die *zentralsten* Knoten in Bezug auf Zusammenhalt und Distanzen sind.

Die Communities sind nicht zufällig entstanden, sondern scheinen - zumindest teilweise - tatsächlich soziale Zusammenhänge widerzuspiegeln. Selbst mit den hier verwendeten einfachen Methoden und ohne weiteres Wissen über tatsächliche soziale Zusammenhänge kann für viele Communities gezeigt werden, dass sie aus gemeinsamen Gruppenzugehörigkeiten entstanden sind. Auch wenn durch soziale Gruppen und Keysigning-Parties plausibel erklärt werden kann, wie viele Communities - und damit auch ein Teil der Gesamtstruktur - entstanden sind, sind diese Ansätze doch nicht ausreichend, um die Entstehung insgesamt zu erklären. Wird die Signaturaktivität der Schlüssel betrachtet, scheint es plausible, dass gerade die Mitglieder klar zuordenbarer Communities eher inaktiv sind, da anderenfalls die ursprüngliche Struktur „verwischt“ würde.

Insgesamt hat sich eine überraschend geringe *öffentliche*¹ Nutzung des Authentifizierungsmechanismus Web of Trust gezeigt. Umso detaillierter das Netzwerk betrachtet wird, umso mehr reduziert sich die Anzahl vermutlich aktiver Schlüssel. Während die große Mehrzahl der vorhandenen Schlüssel überhaupt nicht vernetzt ist, ist auch die Mehrzahl der Schlüssel, die über ein- oder ausgehende Signaturen verfügen, nur sehr schwach vernetzt. Nur innerhalb einer Gruppe von 45.000 Schlüsseln ist überhaupt eine nennenswerte Vernetzungsstruktur feststellbar und auch in dieser sind viele (in Bezug auf Signierungen) vermutlich inaktive Schlüssel enthalten. Die Anzahl der Personen, die durch Signaturaktivität ernsthaft zum Web of Trust beiträgt, scheint in Relation zur Größe der Schlüsseldatenbank und in Anbetracht der Tatsache, dass das Web of Trust ein weltweit . Die große Mehrheit der Personen, die ihre

¹Es ist nicht bekannt, wie viele Benutzer zwar das Web of Trust nutzen, ihre Signaturen aber nicht veröffentlichen. Es scheint jedoch nicht wahrscheinlich, dass es sich dabei um eine signifikante Zahl handelt.

Schlüssel veröffentlicht haben, scheint Schlüssel von Kommunikationspartnern nicht zu authentifizieren.

Im Unterschied zu vielen anderen sozialen Netzwerken ist für das Web of Trust und den in dieser Arbeit vorgestellten Datensatz die gesamte Entwicklungsgeschichte verfügbar. Der Datensatz könnte damit ein interessanter Ansatzpunkt sein, um die Entstehungsdynamik eines komplexen sozialen Netzwerks im Detail zu untersuchen. Dabei könnte beispielsweise die Entstehungsdynamik (Entstehung und Verschmelzung) der Communities verfolgt werden. Auch die Vernetzungsstruktur der Communities in Berücksichtigung ihrer nationalen Zuordnung und die Rolle einzelner Knoten innerhalb von Communities (etwa welche Knoten als „Brücken“ zwischen Communities dienen) könnte untersucht werden.

A. Schema der Tabellen

keyid	version	puid	ctime	exptime	revoktime	alg	keylen
-------	---------	------	-------	---------	-----------	-----	--------

Tabelle A.1: Tabelle *keys*

keyid	uids
-------	------

Tabelle A.2: Tabelle *uids*

signer	signee	level	exptime	ctime	revoktime	hash_alg	pk_alg
--------	--------	-------	---------	-------	-----------	----------	--------

Tabelle A.3: Tabelle *sigs*

Die Zuordnung einzelner Schlüssel zu ihren starken Zusammenhangskomponenten erfolgt über die Tabelle *component_ids*. Diese wird erst in einem separaten Schritt befüllt, nachdem die Komponentenstruktur berechnet wurde.

keyid	component_id
-------	--------------

Tabelle A.4: Tabelle *component_ids*

Als Beispiel gibt Abb. A.1 ein SQL-Statement an, mit dem alle gültigen (d.h. nicht zurückgezogenen oder abgelaufenen) Signaturen zu einem bestimmten Zeitpunkt abgerufen werden können.

```
(SELECT signer , signee
FROM sigs INNER JOIN keys on sigs.signer = keys.keyid
WHERE
(keys.revoketime IS NULL OR keys.revoketime > $timestamp)
AND (keys.exptime IS NULL OR keys.exptime > $timestamp)
AND (sigs.revoketime IS NULL OR sigs.revoketime > $timestamp)
AND (sigs.exptime IS NULL OR sigs.exptime > $timestamp))
INTERSECT
(SELECT signer , signee
FROM sigs INNER JOIN keys on sigs.signee = keys.keyid
WHERE
(keys.revoketime IS NULL OR keys.revoketime > $timestamp)
AND (keys.exptime IS NULL OR keys.exptime > $timestamp)
AND (sigs.revoketime IS NULL OR sigs.revoketime > $timestamp)
AND (sigs.exptime IS NULL OR sigs.exptime > $timestamp))
```

Abbildung A.1: Abfrage aller zum Zeitpunkt \$timestamp gültigen Signaturen

B. Analysewerkzeuge

Die folgende Liste beschreibt die Aufteilung der Analyseaufgaben auf die einzelnen Programme.

basic_properties_mpi Verteilung von Eingangs- und Ausgangsgraden, Komponentengrößen, Nachbarschaften, Durchmesser, Radius, durchschnittliche Pfadlängen (parallelisiert mittels MPI)

correlate_deg Korrelation von ein- und ausgehendem Grad

without Größenentwicklung des Netzwerks, wenn Knoten nach bestimmten Kriterien (Grad, zufällig) entfernt werden

time Zeitliche Entwicklungen (Anzahl Knoten etc.)

simple_stats Statistiken über Benutzung von Algorithmen etc.

mscc_size Zeitliche Entwicklung der Größe der MSCC

clustering_coefficient_ser Berechnung des Clustering-Koeffizienten

betweeness_mpi Berechnung der Betweenness-Centrality (parallelisiert mittels MPI)

investigate_component Untersucht einzelne Zusammenhangskomponente in Bezug auf Herkunft der UserIDs (Domains) und den Zeitraum der Entstehung der Signaturen

investigate_communities Untersucht Communities in Bezug auf Herkunft der UserIDs (Domains) und den Zeitraum der Entstehung der Signaturen

component_structure Struktur der starken Zusammenhangskomponenten

community_structure Struktur der Communities

export Export des Graphen in verschiedene Dateiformate (igraph, Cytoscape)

db-scc-information Befüllt die SQL-Datenbank mit der Zuordnung von Knoten zu Zusammenhangskomponenten

Literaturverzeichnis

- [AlJB00] R. Albert, H. Jeong und A.-L. Barabasi. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406(6794), Juli 2000, S. 378–382.
- [Ashl99] M. Ashley. The GNU Privacy Handbook. Technischer Bericht, Free Software Foundation, 1999.
- [BaAl99] A.-L. Barabasi und R. Albert. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science* 286(5439), 1999, S. 509–512.
- [BaSt04] N. Baumann und S. Stiller. Network Models. In Brandes und Erlebach [BrEr05], S. 341–372.
- [BBBP⁺07] E. Barker, W. Barker, W. Burr, W. Polk und M. Smid. NIST Special Publication 800-57 Part 1, Recommendation for Key Management - Part 1: General (Revised). http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/key_management.html, 2007.
- [BDGG⁺08] U. Brandes, D. Delling, M. Gaertler, R. Görke, M. Hoefer, Z. Nikoloski und D. Wagner. On Modularity Clustering. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 20(2), 2008, S. 172–188.
- [BGLL08] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte und E. Lefebvre. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2008(10), 2008, S. P10008.
- [BnPSDGA04] M. Boguñá, R. Pastor-Satorras, A. Díaz-Guilera und A. Arenas. Models of social networks based on social distance attachment. *Phys. Rev. E* 70(5), Nov 2004, S. 056122.
- [Bren08] V. A. Brennen. The Keysigning Party HOWTO. <http://www.cryptnet.net/fdp/crypto/keysigning-party/en/keysigning-party.html>, 2008.
- [BrEr04] U. Brandes und T. Erlebach. Fundamentals. In *Network Analysis* [BrEr05], S. 7–15.
- [BrEr05] U. Brandes und T. Erlebach (Hrsg.). *Network Analysis: Methodological Foundations [outcome of a Dagstuhl seminar, 13-16 April 2004]*. Band 3418 der *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2005.
- [BrSc04] M. Brinkmeier und T. Schank. Network Statistics. In Brandes und Erlebach [BrEr05], S. 293–317.

- [BrSc06] D. Brondsema und A. Schamp. Konfidi: Trust Networks Using PGP and RDF. In T. Finin, L. Kagel und D. Olmedilla (Hrsg.), *MTW*, Band 190 der *CEUR Workshop Proceedings*. CEUR-WS.org, 2006.
- [CaBH02] S. Capkun, L. Buttyán und J.-P. Hubaux. Small worlds in security systems: an analysis of the PGP certificate graph. In *NSPW '02: Proceedings of the 2002 workshop on New security paradigms*, New York, NY, USA, 2002. ACM, S. 28–35.
- [CaSW05] P. J. Carrington, J. Scott und S. Wasserman. *Models and Methods in Social Network Analysis*: Structural analysis in the social sciences. Cambridge University Press. 2005.
- [CDFS⁺07] J. Callas, L. Donnerhacke, H. Finney, D. Shaw und R. Thayer. OpenPGP Message Format. RFC 4880 (Proposed Standard), November 2007. Updated by RFC 5581.
- [CDFT98] J. Callas, L. Donnerhacke, H. Finney und R. Thayer. OpenPGP Message Format. RFC 2440 (Proposed Standard), November 1998. Obsoleted by RFC 4880.
- [Cede] J. Cederlöf. Web of trust statistics and pathfinder. <http://www.lysator.liu.se/~jc/wotsap/>. [Online; Stand 19. Mai 2010].
- [ClNM04] A. Clauset, M. E. J. Newman und C. Moore. Finding community structure in very large networks. *Phys. Rev. E* 70(6), Dec 2004, S. 066111.
- [ClSN09] A. Clauset, C. R. Shalizi und M. E. J. Newman. Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Review* 51(4), 2009, S. 661–703.
- [Dell07] M. Dell’Amico. Mapping Small Worlds. In M. Hauswirth, A. Wierzbicki, K. Wehrle, A. Montresor und N. Shahmehri (Hrsg.), *Peer-to-Peer Computing*. IEEE Computer Society, 2007, S. 219–228.
- [FoBa07] S. Fortunato und M. Barthelemy. Resolution limit in community detection. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(1), 2007, S. 36–41.
- [Fort10] S. Fortunato. Community detection in graphs. *Physics Reports* 486(3-5), 2010, S. 75 – 174.
- [Gnu10] The GNU Privacy Guard. <http://www.gnupg.org>, May 2010.
- [GodC09] B. H. Good, Y.-A. de Montjoye und A. Clauset. The performance of modularity maximization in practical contexts, 2009.
- [Greg10] S. Gregory. Finding overlapping communities in networks by label propagation. Arxiv preprint arXiv:0910.5516, February 2010.
- [HeGu09] J. Heikkilä und A. Gurkov. Filtering SPAM in P2PSIP Communities with Web of Trust. In A. U. Schmidt und S. Lian (Hrsg.), *MobiSec*, Band 17 der *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences*,

- Social Informatics and Telecommunications Engineering.* Springer, 2009, S. 110–121.
- [KAFL⁺10] T. Kleinjung, K. Aoki, J. Franke, A. Lenstra, E. Thomé, J. Bos, P. Gaudry, A. Kruppa, P. Montgomery, D. A. Osvik, H. te Riele, A. Timofeev und P. Zimmermann. Factorization of a 768-bit RSA modulus. Cryptology ePrint Archive, Report 2010/006, 2010. <http://eprint.iacr.org/2010/006>.
- [KLPR⁺04] D. Koschützki, K. A. Lehmann, L. Peeters, S. Richter, D. Tenfelde-Podehl und O. Zlotowski. Centrality Indices. In Brandes und Erlebach [BrEr05], S. 16–61.
- [LADW05] L. Li, D. Alderson, J. C. Doyle und W. Willinger. Towards a Theory of Scale-Free Graphs: Definition, Properties, and Implications. *Internet Mathematics* 2(4), March 2005, S. 431–523.
- [LaFo09] A. Lancichinetti und S. Fortunato. Community detection algorithms: A comparative analysis. *Phys. Rev. E* 80(5), Nov 2009, S. 056117.
- [LeNe08] E. A. Leicht und M. E. J. Newman. Community Structure in Directed Networks. *Phys. Rev. Lett.* 100(11), Mar 2008, S. 118703.
- [McHP09] C. McDonald, P. Hawkes und J. Pieprzyk. Differential Path for SHA-1 with complexity $O(2^{52})$. Cryptology ePrint Archive: Report 2009/259 <http://eprint.iacr.org/2009/259>, June 2009.
- [MeOV96] A. J. Menezes, P. C. van Oorschot und S. A. Vanstone. *Handbook of Applied Cryptography.* CRC Press. 1996.
- [MiTZ03] Y. Minsky, A. Trachtenberg und R. Zippel. Set reconciliation with nearly optimal communication complexity. *IEEE Transactions on Information Theory* 49(9), 2003, S. 2213–2218.
- [NeGi04] M. E. J. Newman und M. Girvan. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E* 69(2), Feb 2004, S. 026113.
- [NePa03] M. E. J. Newman und J. Park. Why social networks are different from other types of networks. *Phys. Rev. E* 68(3), Sep 2003, S. 036122.
- [Newm02] M. E. J. Newman. Assortative Mixing in Networks. *Phys. Rev. Lett.* 89(20), Oct 2002, S. 208701.
- [Newm03] M. E. J. Newman. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review* 45(2), 2003, S. 167–256.
- [Newm04] M. E. J. Newman. Analysis of weighted networks. *Phys. Rev. E* 70(5), Nov 2004, S. 056131.
- [NMCM09] V. Nicosia, G. Mangioni, V. Carchiolo und M. Malgeri. Extending the definition of modularity to directed graphs with overlapping communities. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2009(03), 2009, S. P03024.

- [Penn] H. P. Penning. analysis of the strong set in the PGP web of trust. <http://pgp.cs.uu.nl/plot/>, 2010. [Online; Stand 19. Mai 2010].
- [PSVV01] R. Pastor-Satorras, A. Vázquez und A. Vespignani. Dynamical and Correlation Properties of the Internet. *Phys. Rev. Lett.* 87(25), Nov 2001, S. 258701.
- [RaAK07] U. N. Raghavan, R. Albert und S. Kumara. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks. *Phys. Rev. E* 76(3), Sep 2007, S. 036106.
- [RoBe08] M. Rosvall und C. T. Bergstrom. Maps of random walks on complex networks reveal community structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(4), 2008, S. 1118–1123.
- [SKS] The SKS keyserver pool. <http://www.sks-keyservers.net/status/>. [Online; Stand 18. Mai 2010].
- [SoHM05] C. Song, S. Havlin und H. A. Makse. Self-similarity of complex networks. *Nature* 433(7024), Januar 2005, S. 392–395.
- [SSAL⁺09] M. Stevens, A. Sotirov, J. Appelbaum, A. K. Lenstra, D. Molnar, D. A. Osvik und B. de Weger. Short Chosen-Prefix Collisions for MD5 and the Creation of a Rogue CA Certificate. In *CRYPTO*, 2009, S. 55–69.
- [TrMi69] J. Travers und S. Milgram. An Experimental Study of the Small World Problem. *Sociometry* 32(4), 1969, S. 425–443.
- [WaSt98] D. J. Watts und S. H. Strogatz. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature* 393(6684), Juni 1998, S. 440–442.
- [WaWW07] R. H. Warren, D. Wilkinson und M. Warnecke. Empirical Analysis of a Dynamic Social Network Built from PGP Keyrings. In E. Airoldi, D. M. Blei, S. E. Fienberg, A. Goldenberg, E. P. Xing und A. X. Zheng (Hrsg.), *Statistical Network Analysis: Models, Issues, and New Directions*, Band 4503 der *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2007, S. 158–171.
- [Wiki10] Wikipedia. Pretty Good Privacy — Wikipedia, The Free Encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pretty_Good_Privacy&oldid=353992410, 2010. [Online; Stand 5. April 2010].