

---

# **Strategische Analyse von Anreizmechanismen in strukturierten Peer-to-Peer Systemen**

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Informatik  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

**genehmigte**  
(bei Veröffentlichung)

**Dissertation**

von

**Stephan Schosser**

aus Leutkirch im Allgäu

Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2008

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klemens Böhm

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. rer. pol. Dr. rer. nat. Bodo Vogt



## Danksagung

Ich danke Klemens Böhm und Bodo Vogt für die sehr gute Betreuung des Forschungsprojektes, welches schließlich zu dieser Arbeit führte. Insbesondere ihre Unterstützung bei der Verwirklichung meiner Ideen, die stark von existierenden Ansätzen abwichen, machte diese Arbeit erst möglich. In den dieser Arbeit vorangegangenen Jahren konnte ich durch ihre Unterstützung nicht nur lernen wissenschaftliche Papiere zu strukturieren und zu schreiben sowie Studenten zu lehren, sondern konnte auch mein Wissen im Bereich Informationsverwaltung und Verhaltensökonomik vertiefen.

Weiterhin danke ich Christian von der Weth, Conny Kühne und Jutta Mülle, die mich während der gesamten Zeit begleitet haben. Sie schafften stets ein angenehmes Arbeitsklima in unserer zunächst sehr überschaubaren Arbeitsgruppe. Eike Kroll und Rainer Schmidt sei für ihre Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der verhaltensökonomischen Experimente gedankt. Zudem gebührt allen übrigen Mitarbeitern der Arbeitsgruppen von Klemens Böhm (Karlsruhe), Bodo Vogt (Magdeburg), Peter Lockemann (Karlsruhe) und Birgitta König-Ries (Jena) großer Dank. Sie alle unterstützten mich durch inhaltliche Diskussionen, Kommentaren zu Entwürfen und ihre Beiträge zur Lehre. Insbesondere die Zusammenarbeit mit Björn-Oliver Hartmann und Frank Eichinger, die beide zusammen mit mir Praktika durchführten und Papiere schrieben, hat mir sehr geholfen.

Neben diesen hauptamtlichen Forschern gebührt auch einigen Studenten großer Dank. Hierbei sei insbesondere Andreas Walther erwähnt. Dank seiner Kreativität und seines Fachwissens war es ein Leichtes gemeinsam Papiere zu erstellen. Johann Korndörfer, Martin Küster, Fabian Zentner und Tobias Reidemeister entwickelten die Experimentsoftware, die sowohl für die verhaltensökonomischen Experimente als auch für Simulationen genutzt wurde. Ohne ihre Hilfe wäre keines der Papiere, welche die Grundlage für diese Arbeit bilden, möglich gewesen. Neben diesen Studenten, welche die Forschung unterstützten, sei Helge Backhaus, Matthias Bracht, Matthias Huber, Nicolas Röper, Tobias Sünder und Natalja Pulter gedankt. Sie alle unterstützten mich bei mindestens einem der von mir durchgeführten Praktika.

Weiterhin gilt all meinen Freunden großer Dank, die mich während meiner gesamten Ausbildung begleitet haben. Insbesondere ohne Sabine und Thorben, Mandy und Thomas, Doreen und Oliver, Anne und Arndt, Tanja und Alexander, Sandra und Aicke, Lisa und Sascha hätte ich nicht zu der Ausgeglichenheit gefunden, die zu einem solch langwierigen Studium notwendig ist.

Auch meine Familie hat einen großen Anteil an dieser Arbeit. Meine Eltern Peter und Marianne haben stets meine Ideen mitgetragen. Sie waren es, die mich darin bestärkten eine Promotion zu beginnen. Mein Bruder Andreas zeigte mir immer wieder die praktische Relevanz der Forschungsarbeiten im Informatikbereich auf, indem er in unterschiedlich innovativen Unternehmen aktuelle Forschungsergebnisse einsetzte.

Schließlich sei Kerstin gedankt. Sie hatte an allen kleinen, auf den ersten Blick unwichtigen Entscheidungen teil, die schließlich den Erfolg des Gesamtprojektes ausmachten.



# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XI
1 Einleitung .....	1
1.1 Strukturierte Peer-to-Peer Systeme .....	2
1.2 Anreizproblem .....	2
1.3 Methoden zur Analyse des Anreizproblems .....	4
1.4 Beiträge dieser Arbeit .....	5
1.5 Gliederung der Arbeit .....	6
2 Grundlagen .....	9
2.1 Überblick über Systemarchitekturen .....	9
2.1.1 Client-Server Architektur .....	9
2.1.2 Unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme .....	10
2.1.3 Strukturierte Peer-to-Peer Systeme .....	11
2.2 Spieltheorie .....	17
2.2.1 Simultane Spiele .....	18
2.2.2 Gleichgewichte in simultanen Spielen .....	19
2.2.3 Endliche Spiele .....	20
2.2.4 Gleichgewichte in endlichen Spielen .....	22
2.2.5 Unendliche Spiele .....	25
2.2.6 Gleichgewichte in unendlichen Spielen .....	25
2.2.7 Mechanismusgestaltung .....	26
2.3 Anreizproblem in Computersystemen .....	26
2.3.1 Client-Server Systeme .....	27
2.3.2 Peer-to-Peer Systeme .....	28
2.3.3 Zusammenfassung und Bewertung .....	31
2.4 Reputationssysteme in Systemen ohne zentrale Instanz .....	31
2.4.1 Informationsquellen .....	32
2.4.2 Ableitung von Vertrauensentscheidungen .....	32
2.4.3 Zusammenfassung und Bewertung .....	34
2.5 Analyse von Reputationssystemen .....	35
2.5.1 Simulationen .....	35
2.5.2 Formale Modellierung .....	37
2.5.3 Empirische Studien .....	38
2.5.4 Zusammenfassung und Bewertung .....	38
2.6 Evaluierung von Anreizmechanismen in Peer-to-Peer Systemen .....	39
2.6.1 Simulationen .....	39
2.6.2 Spieltheoretische Analyse .....	43
2.6.3 Empirische Untersuchung .....	43
2.6.4 Zusammenfassung und Bewertung .....	44
2.7 Offene Fragen .....	45
3 Verhaltensökonomische Betrachtung strukturierter P2P Systeme .....	47
3.1 Modelle und Hypothesen .....	47

3.1.1	Vertrauen und Reziprozität .....	48
3.1.2	Schwellwertstrategien und Freifahrer .....	49
3.1.3	Feedback und Bestrafung .....	51
3.1.4	Heterogenität und Effizienz .....	55
3.2	Experimentaufbau .....	58
3.2.1	Experimententwurf .....	59
3.2.2	Struktur der Experimente .....	59
3.2.3	Realisierung der Untersuchungen .....	60
3.2.4	Experimentreihen .....	62
3.3	Ergebnisse .....	64
3.3.1	Experimentreihe Eigene Beobachtungen .....	65
3.3.2	Experimentreihe Feedback .....	69
3.3.3	Experimentreihe Heterogenität .....	73
3.4	Implikationen der Ergebnisse .....	76
3.4.1	Gewählte Strategien .....	76
3.4.2	Systementwurf .....	77
3.4.3	Übertragbarkeit auf andere Systeme .....	78
4	Ableitung eines formalen Modells .....	81
4.1	Bestimmung der Gleichgewichte .....	84
4.1.1	Teilspielperfektes Gleichgewicht .....	84
4.1.2	Stationäres Gleichgewicht .....	84
4.2	Gleichgewichte in Systemen mit Indirekter Partner Interaktion .....	87
4.3	Effizienz .....	88
4.4	Übertragung auf strukturierte Peer-to-Peer Systeme .....	88
5	Simulationen .....	89
5.1	Hypothesen .....	89
5.1.1	Bestätigung der Gleichgewichte .....	90
5.1.2	Stabilität der Gleichgewichte .....	92
5.2	Simulationsentwurf .....	93
5.2.1	Strategievektor .....	93
5.3	Ergebnisse .....	97
5.3.1	Imitation .....	97
5.3.2	Mutation .....	104
5.4	Diskussion .....	107
6	Vergleich mit traditionellem Softwareentwurf .....	109
6.1	Experimententwurf .....	110
6.2	Realisierung der Experimente .....	111
6.3	Ergebnisse .....	112
6.3.1	Ähnliche Strategieeigenschaften .....	112
6.3.2	Unterschiede zwischen den Strategien .....	113
6.4	Diskussion .....	115
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	117
7.1	Beitrag .....	117
7.2	Ausblick .....	118

Anhang A – Verhaltensökonomische Experimente .....	119
Anhang B – Offline Experimente .....	175
Literaturverzeichnis .....	177
Publikationsliste .....	187
Erklärung .....	189





## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Client-Server Architektur.....	10
Abb. 2: Verschiedene unstrukturierte Peer-to-Peer Architekturen.....	11
Abb. 3: Strukturiertes Peer-to-Peer System.....	12
Abb. 4: Chord-Ring mit $2^4 = 16$ Elementen.....	13
Abb. 5: Bearbeitung der Anfrage ‚1429‘ ausgehend von Peer ‚0642‘.....	14
Abb. 6: Inhaltsadressierbares Netzwerk.....	15
Abb. 7: Spiel als Entscheidungsbaum.....	20
Abb. 8: Spiel als Entscheidungsbaum mit unvollkommener Information.....	21
Abb. 9: Spiel als Entscheidungsbaum mit unvollständiger Information.....	22
Abb. 10: Spiel in Extensivform und induzierte Normalform.....	23
Abb. 11: Spiel in Extensivform mit Aktion O (vgl. [BEH04]).....	24
Abb. 12: Peer-to-Peer System mit einmaliger Interaktion.....	28
Abb. 13: Durchführung von Simulationen (vgl. [BCN99]).....	36
Abb. 14: Strategische Optionen im Dienstmodell von Hens und Vogt [HeV02].....	49
Abb. 15: Bildschirmfoto der Benutzeroberfläche der Experimentumgebung.....	62
Abb. 16: Korrelation zwischen mittlerem Gewinn und Intensität.....	67
Abb. 17: Entwicklung des Kooperationsgrads.....	70
Abb. 18: Strategische Möglichkeiten eines Knotens pro Runde.....	81
Abb. 19: Auszahlungen der Knoten während der letzten 10 Iterationen.....	97
Abb. 20: Vergleich von Systemen mit Erreichung von Effizienz bzw. Ineffizienz.....	98
Abb. 21: Vergleich von Strategieänderungen unter Effizienz und Ineffizienz.....	99
Abb. 22: Entwicklung der Schwellwerte.....	100
Abb. 23: Entwicklung von Kennzahlen während der letzten 10 Iterationen.....	105
Abb. 24: Genetische Wahrscheinlichkeit beim Erreichen Effizienter Gleichgewichte.....	106
Abb. 25: Wahrscheinlichkeit des Effizienten Gleichgewichts Abhängig vom Nutzen.....	106
Abb. 26: Simulation der Strategien aus den Offline Experimenten.....	114



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Maximale Kontakttable von Knoten 0642 (vgl. [ZKJ01]).....	14
Tab. 2: Vergleich verschiedener strukturierter Peer-to-Peer Systeme .....	17
Tab. 3: Gefangenendilemma (vgl. [FuT91]) .....	19
Tab. 4: Kampf der Geschlechter (vgl. [FuT91]).....	19
Tab. 5: Vergleich unterschiedlicher Systemarchitekturen.....	31
Tab. 6: Auszahlungsmatrix des Hilfsspiels.....	54
Tab. 7: Punktänderungen abhängig von der gewählten Aktion .....	61
Tab. 8: Übersicht über die Untersuchungen .....	64
Tab. 9: Typen von Strategien im Strategiespiel .....	66
Tab. 10: Mittlere Auszahlung pro Runde.....	68
Tab. 11: Mittlere Auszahlung ab Runde 10.....	69
Tab. 12: Im Strategiespiel beobachtete Feedbackstrategien.....	71
Tab. 13: Strategiespiel bezüglich Feedback .....	72
Tab. 14: Mittlerer Punktgewinn pro Knoten und Runde .....	73
Tab. 15: Verhaltensänderungen beim Abschicken von Anfragen.....	74
Tab. 16: Verhaltensänderungen beim Antworten und Weiterleiten .....	74
Tab. 17: Auszahlung .....	75
Tab. 18: Anzahl der abgesetzten Anfragen.....	75
Tab. 19: Auszahlungen abhängig von der Strategiewahl pro Runde.....	83
Tab. 20: Aktionen und Nutzenwerte während der Simulationen.....	95
Tab. 21: Vergleich in verhaltensökonomischen und Offline Experimenten .....	112
Tab. 22: Verhaltensänderung unter Heterogenität.....	114



# 1 Einleitung

Die Welt entwickelt sich in den letzten Jahren hin zu einem neuen Kommunikations- und Telekommunikationszeitalter: Die Bedeutung von verschiedenen Diensten im Internet, wie Web 2.0-Anwendungen, Internet-Telefonie oder Fernsehen über das Internet, gewinnen weltweit an Bedeutung [BWT07]. Dabei kommt es zu einer Verschmelzung traditioneller Telekommunikationsnetze, wie dem Telefonnetz oder dem Kabelnetz der Fernsehanbieter, mit IP-basierten Netzen. In der Zukunft sind nicht nur Computer, sondern auch Fernseher, Telefone und elektronische Kleinsteräte, wie digitale Musikspieler oder Navigationsgeräte über IP-Technologie miteinander verbunden und tauschen untereinander Daten aus. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die genutzte Netzwerkinfrastruktur:

*Anzahl der Endgeräte:* Die Anzahl der mit dem Netzwerk verbundenen Endgeräte ist groß. So existierten im September 2006 weltweit bereits 264 Millionen Breitbandanschlüsse, wie DSL oder Kabelmodems [BWT07]. Dazu kommt noch eine Vielzahl weiterer Endgeräte, die nicht über Breitbandanschlüsse verfügen aber dennoch an IP-basierte Netzwerke angeschlossen sind, wie z.B. Mobiltelefone. Die Netzwerkinfrastruktur muss diesem Punkt Rechnung tragen und es ermöglichen, dass eine solch große Zahl an Endgeräten nicht zu einem Zusammenbruch des Gesamtsystems führt.

*Heterogenität der Endgeräte:* Neben Rechnern, die über eine Breitbandverbindung an das Netzwerk angeschlossen sind, gibt es viele Endgeräte, die mit weniger Bandbreite auf das Netzwerk zugreifen. Während handelsübliche Rechner an Breitbandanschlüssen meist sowohl über eine sehr große Bandbreite als auch über sehr viele Ressourcen für Berechnungen und das Bereitstellen von Diensten verfügen, ist dies bei elektronischen Kleinsteräten oft nicht der Fall. Diese Geräte verzichten zu Gunsten ihrer Kompaktheit meist auf eine große Bandbreite, leistungsfähige Batterien und große Datenträger. Dennoch sollte es den Endgeräten unabhängig von ihrer Leistungsfähigkeit möglich sein, angebotene Dienste zumindest eingeschränkt zu nutzen.

*Menge der angebotenen Dienste:* Während die IP-Technologie in der Vergangenheit primär zum Austausch von E-Mail und Webseiten genutzt wurde, eröffnen sich in den letzten Jahren weitere Anwendungsgebiete. So werden über entsprechende Technologie inzwischen Telefongespräche abgewickelt und Fernsehsendungen übertragen [BWT07]. Damit steigt die Menge der über das Netzwerk zu transportierenden Daten (Datenvolumen) stark an. Entsprechend muss es zukünftige Netzwerkinfrastruktur ermöglichen, auch große Mengen an Daten über das System zu transportieren.

Zusammenfassend lässt sich beobachten, dass immer mehr unterschiedliche Dienste von immer mehr großräumig bis weltweit vernetzten Endgeräten benutzt werden. Dabei sind die zur Verfügung stehenden Ressourcen heterogen verteilt und begrenzt: Zum Einen existieren Endgeräte, die nur über eine stark limitierte Menge von Ressourcen verfügen. Zum Anderen führt die Vielzahl der unterschiedlichen Dienste dazu, dass sich diese Dienste die verfügbaren Ressourcen des Endgerätes teilen müssen. Weiterhin sehen sich Dienstanbieter einer Vielzahl von Nachfragern gegenüber, die um die limitierten Ressourcen der Dienstanbieter im Wettbewerb stehen.

## 1.1 Strukturierte Peer-to-Peer Systeme

Abhängig vom Anwendungsgebiet existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Systeminfrastrukturen, um limitierten Ressourcen zu begegnen. Dabei wird im Wesentlichen zwischen zwei Alternativen unterschieden: In Client-Server Systemen bietet ein Teilnehmer, der Dienstgeber (engl. Server), Dienste an, während die anderen Teilnehmer, die Klienten (engl. Clients), diese Dienste konsumieren. Bei Peer-to-Peer Systemen hingegen, bieten alle Teilnehmer, die Knoten (engl. Peers), Dienste an und konsumieren diese. D.h., in Peer-to-Peer Systemen fungieren die Knoten gleichzeitig als Dienstgeber und als Klienten. Während Client-Server Systeme sehr gut geeignet sind Dienste mit überschaubarem Ressourcenaufwand für eine überschaubare Anzahl von Klienten bereitzustellen, kann der Dienstgeber zum Flaschenhals werden, wenn die Anzahl der Teilnehmer sehr groß ist. Peer-to-Peer Systeme lösen dieses Problem. Hier wird die Dienstleistung auf die unterschiedlichen Knoten verteilt. Damit kann kein Knoten zum Flaschenhals werden.

Peer-to-Peer Systeme dienen allgemein der Bereitstellung von Daten. In solchen Systemen kennt jeder Knoten einen Teil aller anderen Knoten im System, seine Kontakte. Die Dienstleistung setzt sich dann aus unterschiedlichen Aktionen zusammen: Zum Einen müssen Anfragen vom Klienten über verschiedene Knoten weitergeleitet werden, bis sie einen Knoten erreichen, der die gesuchten Daten besitzt. Dabei schickt jeder Knoten die einkommenden Anfragen an einen oder mehrere seiner Kontakte weiter. Zum Anderen muss der Empfänger der Anfrage dann die gesuchten Daten an den Klienten übermitteln. In der Literatur wird dabei zwischen strukturierten und unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen unterschieden [StW05]. Während bei unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen die Daten auf beliebigen Knoten abgelegt werden, werden sie in strukturierten Peer-to-Peer Systemen durch feste Zuordnungsvorschriften verteilt. Unter Kenntnis dieser Zuordnungsvorschrift können in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Anfragen zielgerichtet zu dem Knoten weitergeleitet werden, der die gesuchten Daten besitzt.

Hierfür werden in strukturierten Peer-to-Peer Systemen den Datenobjekten Schlüssel zugeordnet. Die Kombination aus Schlüssel und Datenobjekt wird im Folgenden als (Schlüssel, Wert)-Paar bezeichnet. Eine Funktion bildet dann jeden Schlüssel auf einen Punkt in einem Schlüsselraum ab. Diese Abbildungsfunktion ist für alle Knoten gleich und allen Knoten bekannt. Zudem wird der gesamte Schlüsselraum auf Zonen im strukturierten Peer-to-Peer System verteilt. Jeder Knoten verwaltet eine dieser Zonen, d.h. jeder Knoten kennt alle (Schlüssel, Wert)-Paare, welche durch die Funktion auf Punkte in seiner Zone abgebildet werden. Zudem kennt jeder Knoten eine Auswahl der Knoten, seine Kontakte, und deren Zonen. Eine typische Anfrage in einem strukturierten Peer-to-Peer System ist das Anfordern eines Wertes unter Benutzung des dazugehörigen Schlüssels. Bei der Bearbeitung einer Anfrage wird zunächst der Schlüssel auf seine Position im Schlüsselraum, den Anfragepunkt, abgebildet. Liegt der Anfragepunkt im Schlüsselraum des aktuellen Knoten, so gibt dieser das gesuchte (Schlüssel, Wert)-Paar an den Anfragenden zurück. Andernfalls wird die Anfrage an den Nachbarn weitergeleitet, der dem Anfragepunkt am nächsten ist. Dieser Schritt wird dann solange wiederholt bis schließlich der Knoten erreicht wird, der das Anfrageergebnis verwaltet.

## 1.2 Anreizproblem

Die Vorteile von Peer-to-Peer Systemen, wie das Fehlen eines Flaschenhalses, werden mit eingeschränkter Kontrolle der Knoten erkauft. Während in Client-Server Systemen der Dienstgeber beobachten kann, welcher Knoten wie viel Leistung konsumiert, ist dies in Peer-to-Peer

Systemen nicht mehr einfach möglich. Hier bieten sich unterschiedliche Knoten gegenseitig die Daten an ohne von einer zentralen Instanz überwacht zu werden. Ist der Verzicht auf einen Flaschenhals aus technischer Sicht wünschenswert, so ist er aus strategischer Sicht problematisch: Die Knoten innerhalb eines Peer-to-Peer Systems werden von verschiedenen Menschen, im Folgenden auch Teilnehmer, gesteuert. Jeder einzelne Teilnehmer hat dabei ein Interesse daran, seinen eigenen Profit am System zu maximieren. Die auftretenden Probleme und daraus resultierenden Anforderungen lassen sich mit Peer-to-Peer Dateitauschbörsen illustrieren.

Studien früher Peer-to-Peer Dateitauschbörsen, wie Gnutella [AdH00, SGG02], zeigen, dass ein Großteil der Teilnehmer ihren Nutzen erhöht, indem sie Freifahrerverhalten zeigen. Freifahrer konsumieren zwar Ressourcen, die andere bereitstellen, teilen aber selbst keine eigenen Ressourcen. Im Fall von Peer-to-Peer Dateitauschbörsen bedeutet dies, dass die Teilnehmer zwar Daten herunterladen, aber diese nach dem Herunterladen dem Peer-to-Peer System nicht wieder zur Verfügung stellen.

Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren so genannte Anreizmechanismen für Peer-to-Peer Systeme entwickelt. Hierbei werden dem Teilnehmer Anreize für kooperatives Verhalten gegeben, während unkooperatives Verhalten bestraft wird. Im Fall von Peer-to-Peer Dateitauschbörsen werden z.B. reziproke („Wie du mir, so ich dir“) Strategien vorgeschlagen [ZgA07]: Ein Teilnehmer darf nur Daten herunterladen, wenn er auch anderen Teilnehmern Daten zur Verfügung stellt oder zur Verfügung gestellt hat.

Einige Peer-to-Peer Tauschbörsen nutzen diesen Gedanken: So speichert bei Kazaa [AnG04] jeder Knoten den Grad seines Beitrags zum System auf der Basis der in der Vergangenheit selbst angebotenen und heruntergeladenen Datenmenge. Will ein Knoten A Daten von einem anderen Knoten B beziehen, so muss Knoten A den Grad seines Beitrags an Knoten B übermitteln. Knoten B entscheidet dann auf Basis dieses Wertes, ob Knoten A die Daten beziehen darf oder nicht. In der Praxis wird dieser Mechanismus aber umgangen [AnG04]: Da jeder Knoten für seinen eigenen Grad des Beitrags verantwortlich ist, erweiterten findige Programmierer die Software so, dass ihr Knoten stets den maximal möglichen Grad des Beitrags meldete. Sie konnten so Daten herunterladen, ohne selbst Daten anbieten zu müssen. In der Folge verbreitete sich die modifizierte Software für das gleiche Netzwerk im Internet und der Anreizmechanismus war damit nutzlos.

In späteren Peer-to-Peer Dateitauschbörsen, wie beispielsweise BitTorrent, beobachten die Knoten das Verhalten anderer Knoten, mit denen sie in der Vergangenheit interagiert haben [ZgA07]. D.h., im Gegensatz zu früheren Systemen, wie Kazaa, speichert nicht mehr der Knoten selbst seinen Beitrag, sondern Andere beobachten den Beitrag und speichern ihn. Damit können die Knoten durch falsche Angaben keinen Vorteil mehr erhalten. Zwar erhöht dies die Bereitschaft der Teilnehmer Daten bereitzustellen, diese Bereitschaft ist aber nicht so hoch wie erwartet [ZgA07]: Da die Beobachtung anderer Knoten nicht perfekt ist (ein Knoten kennt nur seine eigenen Beobachtungen), ist es den Knoten erlaubt weniger Daten bereitzustellen als sie selbst konsumieren. In der Praxis wird dies ausgenutzt, indem die Teilnehmer Daten nach dem Herunterladen dem System nicht mehr zugänglich machen. Die Anreize sind somit schlecht gesetzt. Zwar werden die Teilnehmer dazu motiviert einen Mindestbeitrag für das System zu leisten, Beiträge darüber hinaus sind aber nicht mehr notwendig.

Bisher wurde das Problem mangelnder Kooperation, also des Mangels an bereitgestellten Daten, ausschließlich am Beispiel von Peer-to-Peer Dateitauschbörsen erläutert. Dennoch ist auch für andere Anwendungsgebiete von Peer-to-Peer Systemen davon auszugehen, dass sich

menschliche Teilnehmer ähnlich verhalten: Generell können die Teilnehmer ihren Nutzen am System immer dadurch erhöhen, dass sie selbst keine Ressourcen bereitstellen, jedoch Ressourcen anderer konsumieren. Aus dem Beispiel der Peer-to-Peer Dateitauschbörsen ergeben sich Beobachtungen bezüglich Anreizmechanismen: Erstens, finden menschliche Teilnehmer existierende Lücken in Anreizmechanismen und nutzen diese aus. Dies führt dann zu einer Reduktion der ausgetauschten Datenmenge. Zweitens, greifen Teilnehmer beim Ausnutzen solcher Lücken auf zwei Strategien zurück: Sie setzen entweder modifizierte Software ein, welche die Anreizmechanismen automatisch umgeht, oder reduzieren manuell die den anderen Knoten bereitgestellten Ressourcen.

Während unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme auch funktionieren, wenn ein großer Teil der Knoten Freifahrerverhalten zeigt - die oben erwähnten Dateitauschbörsen bestanden trotz Freifahrerverhaltens über mehrere Jahre - ist das Anreizproblem in strukturierten Peer-to-Peer Systemen besonders drängend: Bei unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen werden Anfragen nicht zielgerichtet über jeweils nur einen Knoten weitergeleitet. Damit reicht pro Weiterleitung ein kooperativer Knoten aus, um eine Anfrage schließlich beantwortet zu bekommen. Für strukturierte Peer-to-Peer Systeme kann dagegen gezeigt werden, dass schon ein Anteil von 5% Knoten, die Anfragen weder weiterleiten noch beantworten, dazu führt, dass nur 60% der Anfragen beantwortet werden [BuB04b]. D.h. während unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme einen relativ hohen Anteil Knoten toleriert, die keine Anfragen bearbeiten, muss dieser Anteil in strukturierten Peer-to-Peer Systemen sehr gering sein.

### **1.3 Methoden zur Analyse des Anreizproblems**

Um den Erfolg des Verhaltens, also der Strategie, eines Knoten beurteilen zu können, werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen: Wie im vorangegangenen Abschnitt demonstriert, helfen empirische Studien den Erfolg existierender Anreizmechanismen zu messen. Dies hat aber den Nachteil, dass entsprechende Software von vielen Knoten genutzt werden und damit für die Teilnehmer sehr attraktiv sein muss. Ein vom genutzten Anreizmechanismus abhängiger systematischer Vergleich verschiedener Strategien ist dadurch nicht möglich.

Eine Alternative bieten Simulationen und spieltheoretische Modelle. Bei beiden Ansätzen werden Strategien modelliert und numerisch (bei Simulationen) oder formal (bei spieltheoretischen Modellen) evaluiert. Modelle für Strategien werden dabei entweder von empirischen Studien abgeleitet oder vom Modellersteller vorgegeben. Sind keine empirischen Studien verfügbar, muss der Modellersteller die Strategien der menschlichen Teilnehmer antizipieren. Für den Modellersteller lässt sich dann aber nur schwer sicherstellen, ob die antizipierten Strategien auch tatsächlich wie von ihm erwartet von Teilnehmern eingesetzt werden.

Um den Einsatz von Strategien in der Realität zu prüfen, können verhaltensökonomische Untersuchungen eingesetzt werden. Sie werden insbesondere in der experimentellen Wirtschaftsforschung genutzt, um die Strategien von Menschen unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu untersuchen. Solche Untersuchungen erlauben es beispielsweise, Menschen mit verschiedenen Anreizmechanismen zu konfrontieren und ihre Strategie abhängig vom Anreizmechanismus zu beobachten. Ziel solcher Untersuchungen ist die Erstellung von Modellen bezüglich der Strategien von Menschen, die dann wieder als Grundlage für Simulationen und spieltheoretische Modelle genutzt werden können.



## 1.4 Beiträge dieser Arbeit

Das Anreizproblem ist in strukturierten Peer-to-Peer Systemen besonders drängend. Hier ist bereits ein geringer Anteil unkooperativer Knoten ausreichend, um das System zu destabilisieren. Während verschiedene Anreizmechanismen existieren um diesem Problem zu begegnen, ist deren Evaluation schwierig: Der Erfolg solcher Anreizmechanismen hängt stark von den Strategien der Knoten im System ab. Ziel dieser Arbeit ist daher die Analyse des Verhaltens strategisch handelnder Knoten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen und des Einflusses menschlichen Verhaltens auf die genutzten Anreizmechanismen.

Dabei wird auf die unterschiedlichen, aus der Literatur bekannten Methoden zurückgegriffen. Es werden also zunächst verhaltensökonomische Untersuchungen genutzt um zu beobachten, welchen Strategien menschliche Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen folgen. Zwar existieren empirische Studien bezüglich menschlichen Verhaltens in unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen (siehe [AdH00, ZgA07]), solche Systeme unterscheiden sich jedoch aus strategischer Sicht stark von strukturierten Peer-to-Peer Systemen: In strukturierten Peer-to-Peer Systemen kommt jedem Knoten große Bedeutung zu, da jede Anfrage über genau einen Knoten weitergeleitet wird. Zeigt dieser Freifahrerverhalten, so geht die Anfrage verloren. Auf der Basis dieser Beobachtungen wird schließlich ein formales Modell abgeleitet, welches das Verhalten der Knoten beschreibt und es ermöglicht theoretische Vorhersagen über das System zu machen. Schließlich wird das Modell mit Hilfe von Simulationen evaluiert.

**Verhaltensökonomische Untersuchungen:** In dieser Arbeit werden zur verhaltensökonomischen Untersuchung die Aktionen *Stellen von Anfragen*, *Weiterleiten von Anfragen* und *Beantworten von Anfragen* in einem strukturierten Peer-to-Peer System mit Kosten versehen. Menschen übernehmen dann die Rolle eines Knotens in einem Peer-to-Peer System und entscheiden an Stelle eines Softwareartefakts, wie sie mit eingehenden Anfragen umgehen und ob sie selbst Anfragen stellen.

Auf Basis der Kosten für die unterschiedlichen Aktionen wird in mehreren verhaltensökonomischen Experimentreihen das Verhalten menschlicher Teilnehmer untersucht. Eine erste Experimentreihe zeigt, dass sich Menschen in strukturierten Peer-to-Peer Systemen reziprok verhalten. D.h., Menschen kooperieren ausschließlich mit anderen kooperativen Knoten. Dabei definieren sie Kooperativität über Schwellwertstrategien, d.h. die Teilnehmer beobachten für jede Anfrage, die sie über andere Knoten schicken, ob diese beantwortet wurde oder nicht. Auf Basis dieser Beobachtungen berechnen sie den Kooperationswert des Gegenübers als Quotient aus der Anzahl beantworteter Anfragen durch die Anzahl abgeschickter Anfragen. Ist dieser Quotient größer als ein bestimmter Schwellwert, so wird kooperiert, andernfalls nicht. Mit Hilfe dieser Strategie konnten die Teilnehmer zwischen kooperativen und unkooperativen Knoten unterscheiden.

In einer zweiten Experimentreihe wird den Teilnehmern erlaubt Beobachtungen über andere Knoten, so genanntes Feedback, auszutauschen. Mit dieser Experimentreihe wird gezeigt, dass reziproke Schwellwertstrategien allein schon so erfolgreich sind, dass menschliche Teilnehmer nicht auf Feedback zurückgreifen – so lange sie selbst eigene Beobachtungen besitzen. Der Verzicht auf Feedback ist vorteilhaft für den genutzten Anreizmechanismus: Es müssen weder Feedback-Informationen vorgehalten, noch ausgewertet werden.

Schließlich wird untersucht, welchen Einfluss Heterogenität auf das Verhalten der Teilnehmer hat. D.h. es wird untersucht, ob sich Teilnehmer anders verhalten, wenn ihre Auszahlungen

unterschiedlich sind und sie die Knoten identifizieren können, die wesentlich mehr als sie selbst verdienen. Die Auswertung entsprechender Experimente ergibt, dass die Teilnehmer ihre Strategie nicht ändern, selbst wenn sie zu den Knoten im System gehören, die wenig verdienen. Dies ist auf Wettbewerb der Knoten untereinander zurückzuführen: Jeder Knoten in einem strukturierten Netzwerk unterliegt dem Wettbewerb mit seinen Kontakten. Ist die Mehrheit der Kontakte kooperativer als er selbst, so muss der Knoten befürchten, dass seine Kontakte bevorzugt Anfragen anderer Knoten weiterleiten. Daher liegt es im Interesse eines jeden Knotens, sich so kooperativ wie möglich zu verhalten. Jede Abweichung von kooperativem Verhalten führt somit zu einer Reduktion seiner Auszahlung.

**Spieltheoretische Modellierung:** Die Ergebnisse der verhaltensökonomischen Experimente werden in ein formales Modell überführt. Das so erstellte Modell besitzt den Vorteil, dass es weniger komplex ist als ein Modell, das auf Basis aller theoretisch möglichen Strategien erstellt wurde: Es beschreibt nur die auftretenden Strategien, ohne an Aussagekraft einzubüßen: Zwar werden einzelne Strategien nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch nicht problematisch: Sie treten in der Praxis gemäß der Beobachtungen im Experiment nicht auf. Mit diesem Modell wird dann gezeigt, dass die von menschlichen Teilnehmern genutzten Strategien das Erreichen eines effizienten Gleichgewichts in strukturierten Peer-to-Peer Systemen ermöglichen.

**Simulationen:** Danach werden die beobachteten Strategien implementiert und mit einem Simulator untersucht, ob die im formalen Modell und den verhaltensökonomischen Experimenten gefundenen Gleichgewichte auch in Systemen mit sehr vielen Knoten erreicht werden. Dafür wird eine Strategie implementiert, welche den beobachteten Strategieraum abbildet und sich dynamisch an die Strategien erfolgreicher Knoten anpasst. Die Simulationen bestätigen die Aussagen des formalen Modells.

**Validierung des Modells:** Weiterhin wird untersucht, unter welchen Umständen menschliche Teilnehmer das effiziente Gleichgewicht erreichen. Hierfür wird zwischen zwei Szenarien unterschieden: Bei verhaltensökonomischen Experimenten übernehmen die Teilnehmer die Rolle eines Knotens und können den Effekt ihrer Handlungen unmittelbar beobachten. Bei Offline Experimenten konzipieren und programmieren die Teilnehmer die Strategie eines Knotens, der dann mit den Strategien anderer Teilnehmer konfrontiert wird. Entsprechende Analysen zeigen, dass die Strategien in Offline Experimenten im Gegensatz zu verhaltensökonomischen Experimenten kein effizientes Gleichgewicht erreichen. Diese Untersuchung ist wichtig: Sie zeigt, dass menschliche Teilnehmer abhängig vom Vorgehen beim Entwurf unterschiedliche Strategien entwickeln. Zwar sind die grundlegenden Eigenschaften der genutzten Strategien identisch, jedoch verhalten sich Teilnehmer in Offline Experimenten deutlich unkooperativer als in verhaltensökonomischen Experimenten.

## 1.5 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen dieser Arbeit eingegangen. Dabei werden zunächst strukturierte Peer-to-Peer Systeme eingeführt und von unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen sowie Client-Server-Systemen abgegrenzt. Anschließend werden die formalen Grundlagen von sowohl verhaltensökonomischen Experimenten als auch anreizbasierten Untersuchungen erläutert. Dafür wird ein kurzer Überblick über die Spieltheorie gegeben. Aufbauend auf diesen Grundlagen wird erläutert, welche Anreizprobleme in Rechnersystemen auftreten und welche Mechanismen in der Vergangenheit für diese Systeme vorgeschlagen wurden. Kapitel 2 schließt mit einer Beschreibung verschiedener Methoden zur Evaluierung von Anreizmechanismen, ehe auf die Stärken und Schwächen dieser Arbeiten eingegangen wird.

In Kapitel 3 werden verhaltensökonomische Experimente zur Untersuchung von Strategien in strukturierten Peer-to-Peer Systemen diskutiert. Dabei wird zunächst das Vorgehen bei solchen Experimenten erläutert, ehe die Ergebnisse dieser Experimentreihen beschrieben werden.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der spieltheoretischen Formalisierung der in den verhaltensökonomischen Experimenten beobachteten Strategien und der Bestimmung der Gleichgewichte in strukturierten Peer-to-Peer Systemen.

In Kapitel 5 werden die in verhaltensökonomischen Experimenten beobachteten Strategien mit Simulationen überprüft. Dabei kann gezeigt werden, dass auch ein simuliertes System die vom Modell in Kapitel 4 vorhergesagten Gleichgewichte erreicht.

Schließlich wird in Kapitel 6 untersucht, ob sich Menschen, die Strategien implementieren, gleich verhalten, wie Menschen, die an den verhaltensökonomischen Experimenten teilnehmen.

Eine Zusammenfassung in Kapitel 7 beschließt diese Arbeit.



## 2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. Dieses Kapitel unterteilt sich in drei Bereiche, die jeweils aus je zwei Abschnitten bestehen:

**Technische und formale Grundlagen:** Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist in Abschnitt 2.1 ein Überblick über verschiedene Systemarchitekturen. Dabei liegt der Fokus auf der Einführung verschiedener Varianten strukturierter Peer-to-Peer Systeme und deren Abgrenzung gegenüber anderen Architekturen, wie Client-Server Systeme und unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme. Anschließend gibt Abschnitt 2.2 eine kurze Einführung in die Spieltheorie. Die dabei eingeführten Gleichgewichtskonzepte sind die Basis formaler, wissenschaftlicher Untersuchungen von Anreizmechanismen. Auf sie wird in Kapitel 3 bei der Motivation von verhaltensökonomischen Experimenten zurückgegriffen und sie bilden die Grundlage des in Kapitel 4 erstellten formalen Modells.

**Anreize in Systemarchitekturen:** In Abschnitt 2.3 wird auf Basis der vorangegangenen Abschnitte das Anreizproblem in verschiedenen Systemarchitekturen eingegrenzt, ehe in Abschnitt 2.4 unterschiedliche Anreizmechanismen zur Lösung des Anreizproblems beschrieben werden.

**Evaluierung von Anreizmechanismen:** Schließlich werden in Abschnitt 2.5 unterschiedliche Methoden zur Analyse von Anreizmechanismen aufgezeigt. Für jede der eingeführten Methoden werden in Abschnitt 2.6 Arbeiten aus der Literatur vorgestellt, die Gebrauch von diesen Mechanismen machen. Dabei wird auf die Schwächen und Stärken dieser Arbeiten eingegangen.

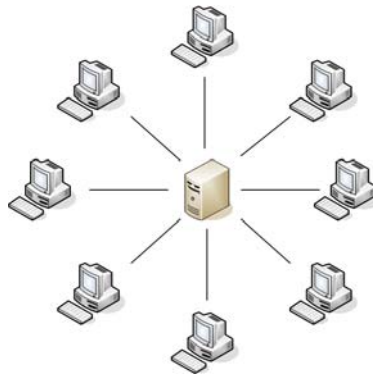
Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung.

### 2.1 Überblick über Systemarchitekturen

Seit dem Aufkommen des Internets wurden die Client-Server Architektur und die Peer-to-Peer Architektur eingesetzt, um Rechnerressourcen verteilt zu nutzen [MHP01]. In diesem Abschnitt werden diese beiden Systemarchitekturen vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf den technischen Unterschieden dieser Systeme. Die Betrachtung der alternativen Systemarchitekturen veranschaulicht die auftretenden Anreizprobleme in Abschnitt 2.3 und illustriert damit die Anforderungen an Anreizmechanismen. Daher wird im Folgenden nicht nur auf Peer-to-Peer Systeme (Abschnitt 2.1.3 und Abschnitt 2.1.2), sondern auch auf die Client-Server Architektur (Abschnitt 2.1.1), eingegangen.

#### 2.1.1 Client-Server Architektur

In Client-Server Systemen stellt ein zentrales System, der Dienstgeber (engl. Server), alle Daten für die Knoten, die Klienten (engl. Clients), zur Verfügung (siehe Abb. 1) [DGH04]. Die Klienten fordern diese Daten direkt vom Dienstgeber an [StW05]. Dabei ist allen Klienten die Adresse des Dienstgebers bekannt. Der Dienstgeber beantwortet die Anfragen der Klienten, indem er die gewünschten Daten bereitstellt. Anders als die Dienstgeber stellen die Klienten keine Daten bereit. Meist ist der Dienstgeber ein leistungsfähiges System, während die Klienten leistungsschwach sind. Der Dienstgeber muss nicht zwingend ein einzelner Rechner sein. Er kann auch als Zusammenschluss mehrerer Rechner realisiert sein, die über einen Zugangspunkt mit fester Adresse erreichbar sind.



**Abb. 1: Client-Server Architektur**

### 2.1.2 Unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme

Im Gegensatz zu Client-Server Systemen wird bei Peer-to-Peer Systemen nicht zwischen Dienstgebern und Klienten unterschieden. Jeder Knoten (engl. Peer) innerhalb eines Peer-to-Peer Systems stellt gleichzeitig Daten zur Verfügung und fragt solche nach [StW05]. Ein Knoten ist in diesem Kontext eine Anwendung, die auf einem Rechner, sei es ein handelsüblicher Rechner, eine Spielekonsole oder ein Mobiltelefon, ausgeführt wird.

Um die Bezeichnungen der Teilnehmer in einem Computersystem in dieser Arbeit konsistent zu halten, wird hier folgende Nomenklatur genutzt: Alle Teilnehmer in einem Netzwerk werden als *Knoten* bezeichnet. Knoten, welche Daten anfragen, sind *Klienten*, während Knoten, welche Daten bereitstellen, als *Dienstgeber* bezeichnet werden.

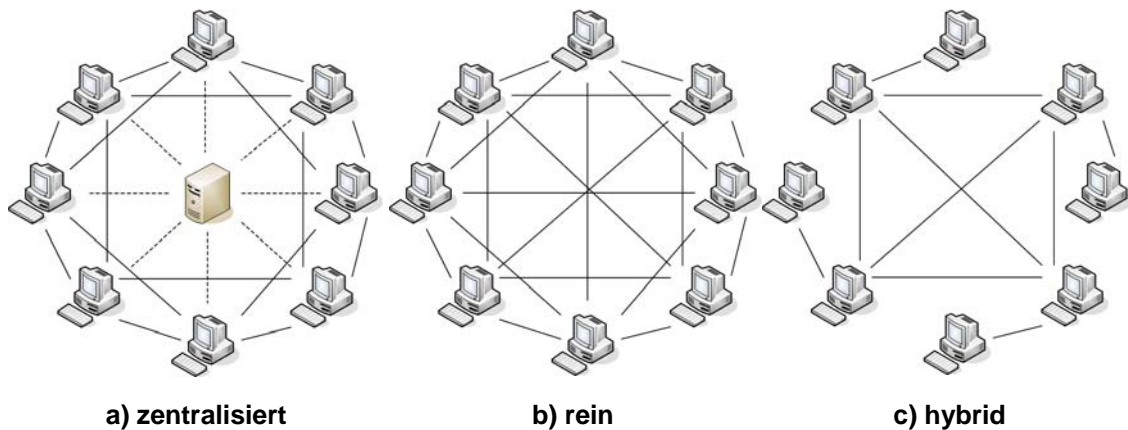
Auf Basis des Grundkonzepts von Peer-to-Peer Systemen werden verschiedene Ausprägungen von Peer-to-Peer Systemen unterschieden [StW05].

**Zentralisierte Peer-to-Peer Systeme:** Zentralisierte Peer-to-Peer Systeme (siehe Abb. 2, a) haben ähnliche Eigenschaften wie Client-Server Systeme: In dieser Art von Systemen existiert eine zentrale Instanz [StW05]. Die zentrale Instanz indexiert die im System bereitgestellten Daten sowie die Adressen der anbietenden Knoten. Knoten, die auf Daten zugreifen wollen, fragen bei der zentralen Instanz an, welcher Knoten die gesuchten Daten anbietet. Diese Daten werden dann direkt vom anbietenden Knoten bezogen. Auf diese Weise kann die Last der zentralen Instanz, verglichen mit Client-Server Systemen reduziert werden: Die zentrale Instanz selbst stellt den Knoten lediglich einen Indexierungsdienst bereit.

**Reine Peer-to-Peer Systeme:** Reine Peer-to-Peer Systeme (siehe Abb. 2, b), als Alternative zu zentralisierten Peer-to-Peer Systemen, sind die pure Form von Peer-to-Peer Systemen [StW05]. In dieser Art von Systemen existiert kein zentrales System. D.h. hier wird keine Indexierung der Daten vorgenommen. Die in einem reinen Peer-to-Peer System bereitgestellten Daten werden gefunden, indem jeder Knoten die Anfragen an alle Knoten weiterleitet, die er kennt und von denen er eine Antwort erwartet [KGZ02]. Knoten, welche die gesuchten Daten bereitstellen können, bieten diese Daten direkt dem anfragenden Knoten an.

**Hybride Peer-to-Peer Systeme:** Hybride Peer-to-Peer Systeme sind eine Mischung aus zentralisierten und reinen Peer-to-Peer Systemen (siehe Abb. 2, c) [StW05]. In diesen Systemen wird zwischen normalen Knoten und ausgewählten Superknoten unterschieden. Ähnlich wie die zentrale Instanz in zentralisierten Peer-to-Peer Systemen indexieren die Superknoten die ver-

fügbaren Daten. Die Superknoten kennen jedoch nur einen Ausschnitt des Netzwerkes. Normale Knoten können ihre Anfragen zunächst an einen Superknoten schicken. Kann dieser keinen passenden Dienstgeber nennen, so kann die Anfrage auch hier in das System geflutet werden.



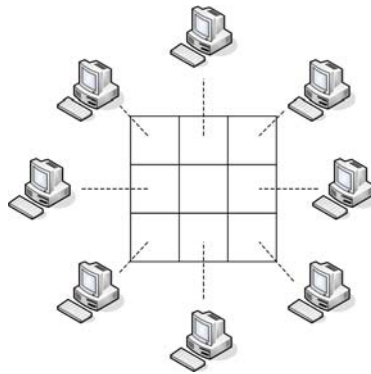
**Abb. 2: Verschiedene unstrukturierte Peer-to-Peer Architekturen**

**Bewertung:** Unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme unterscheiden sich durch die Realisierung der Indexierung der Daten. Diese unterschiedlichen Architekturalternativen resultieren aus einem Zielkonflikt zwischen dem Aufwand bei der Weiterleitung von Anfragen und der Stabilität des Gesamtsystems [AnS04]: Jede Anfrage eines Knotens muss durch das System zu einem geeigneten Dienstgeber geleitet (engl. geroutet) werden. Bei zentralisierten Systemen ist dies mit dem geringsten Aufwand möglich. Hier erreicht die Anfrage zwei Teilnehmer: Die zentrale Instanz und den Dienstgeber. Bei reinen Peer-to-Peer Systemen ist der entsprechende Aufwand maximal. Hier wird die Anfrage an einen Großteil der Knoten im Netz versandt. Der Aufwand für das Weiterleiten in hybriden Peer-to-Peer Systemen liegt zwischen diesen beiden Extremen. In zentralisierten Peer-to-Peer Systemen führt die zentrale Instanz zu einer Verringerung der Stabilität: Fällt die zentrale Instanz aus, so können keine Anfragen mehr bearbeitet werden. Dieses Problem tritt bei reinen Peer-to-Peer Systemen nicht auf. Hier ist jeder Knoten ersetzbar. Auch hier befinden sich hybride Peer-to-Peer Systeme zwischen den Extremen. Fällt ein Superknoten aus, so kann er zwar durch andere Superknoten ersetzt werden, ein Teil der ersten Anfragen nach dem Ausfall kann aber nicht mit dem sonst üblichen geringen Aufwand bearbeitet werden.

### 2.1.3 Strukturierte Peer-to-Peer Systeme

Ist es auch nicht möglich den Zielkonflikt zwischen Aufwand bei der Weiterleitung und Stabilität des Gesamtsystems zu lösen, so ist doch die Identifikation eines Mittelwegs erstrebenswert [StW05]. Ein solcher Mittelweg zur Indexierung der im System vorhandenen Daten kann mit Hilfe verteilter Hashtabellen (engl. distributed hash tables) erreicht werden. Im Kontext von Peer-to-Peer Systemen spricht man dabei von strukturierten Peer-to-Peer Systemen (siehe Abb. 3).

Strukturierte Peer-to-Peer Systeme unterstützen Anfragen nach (Schlüssel, Wert)-Paaren. D.h. ein anfragender Knoten sucht nach dem Wert zu einem gegebenen Schlüssel [PRR97]. Dabei ist der Schlüssel ein Wert, welcher die angeforderten Daten beschreibt. Der Wert kann entweder die Adresse eines Knotens sein, der die gesuchten Daten anbietet, oder der Wert beinhaltet die Daten selbst.



**Abb. 3: Strukturiertes Peer-to-Peer System**

Existierende strukturierte Peer-to-Peer Systeme unterscheiden sich primär in der Struktur des Schlüsselraums. Die Struktur des Schlüsselraums definiert, welche Knoten direkt miteinander interagieren und welcher Knoten für welche Daten verantwortlich ist. Im Folgenden werden die wichtigsten strukturierten Peer-to-Peer Systeme beschrieben. Dabei wird nach der Form des Schlüsselraums unterschieden. Die Klassifikation folgt dem Vorschlag von Risson und Moors [RiM06].

**Ringförmiger Schlüsselraum:** Ein System mit ringförmigem Schlüsselraum ist Chord [SMK03]. Hier wird jedem Knoten basierend auf seiner Adresse eine  $m$ -Bit lange Identifikationsnummer (ID) zugeordnet. Für den Schlüssel jedes Datenobjekts, das im System abgelegt wird, wird ebenfalls eine  $m$ -Bit lange ID generiert. Die IDs werden mittels einer Hash-Funktion erzeugt. Als Hash-Funktion wird SHA-1 [FIP95] genutzt.

Für die Zuordnung von Schlüsseln zu Knoten werden alle Identifikationsnummern in einem Kreis mit  $2^m$  Elementen angeordnet. Der resultierende Kreis wird als Chord-Ring bezeichnet. Jeder Schlüssel wird von dem Knoten verwaltet, der im Chord-Ring entweder auf derselben Position wie der Schlüssel liegt oder der dem Schlüssel im Uhrzeigersinn als erster Knoten folgt.

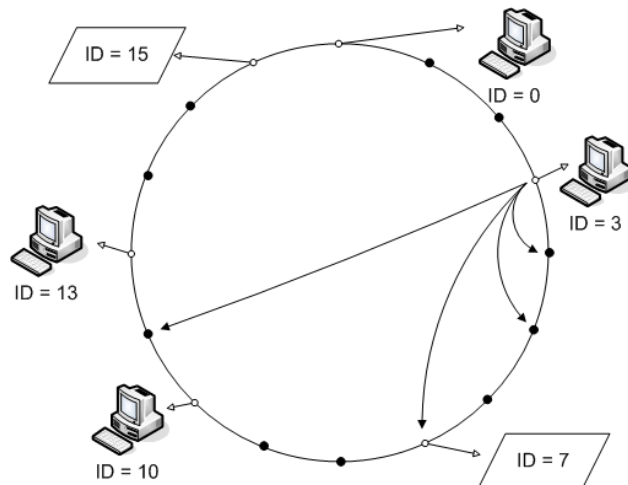
*Beispiel:* Abb. 4 zeigt einen Chord-Ring mit  $m = 4$ . D.h. der dargestellte Chord-Ring hat  $2^4 = 16$  Elemente. Diese Elemente sind durch Punkte auf dem Kreis gekennzeichnet. Weiterhin besitzt der Chord-Ring zwei Dokumente (mit ID = 7 und ID = 15) und vier Knoten (mit den IDs 0, 3, 10 und 13). Nicht alle Elemente des Chord-Rings sind einem Dokument oder einem Knoten zugeordnet. So sind beispielsweise die IDs 1 und 2 nicht besetzt. Jeder Knoten verwaltet nun die Datenobjekte, die zwischen ihm und seinem Vorgänger im Kreis liegen. D.h. der Knoten mit der ID 10 ist für die Datenobjekte mit den IDs 4 bis 10 verantwortlich. In diesem Bereich liegt nur das Datenobjekt mit der ID 7. Das Datenobjekt mit der ID 0 wird von dem Knoten mit der ID 3 verwaltet. ■

Neben den Datenobjekten in seinem Bereich verwaltet jeder Knoten eine Tabelle mit Kontakten. Diese Kontakttablette enthält maximal  $m$  Kontakte. Dabei ist der  $i$ -te Eintrag der Kontakttablette der erste Knoten, der mindestens  $2^{i-1}$  Elemente hinter dem Knoten liegt, wobei  $1 \leq i \leq m$  gilt.

*Beispiel:* Im Chord-Ring aus Abb. 4 mit  $m = 4$ , enthält die Kontakttablette des Knotens mit der ID = 3 die Knoten, die mindestens folgende Entfernung zu Knoten 3 besitzen: Erster Eintrag der Kontakttablette ist Knoten 10 mit der Entfernung größer oder gleich  $2^0 (= 1)$ . Der zweite Knoten in der Liste (auch Knoten 10) besitzt mindestens die Entfernung  $2^1 (= 2)$ . Der dritte Knoten in



der Liste ist ebenfalls Knoten 10, er hat die Entfernung größer oder gleich  $2^2$  (= 4). Der vierte Knoten hat mindestens eine Entfernung von  $2^3$  (= 8), also Knoten 13. ■



**Abb. 4: Chord-Ring mit  $2^4 = 16$  Elementen**

Daten im System werden mit Hilfe eines iterativen Verfahrens gefunden. Liegt die Identifikationsnummer des gesuchten Schlüssels zwischen dem aktuellen Knoten und seinem direkten Nachfolger (dem ersten Eintrag in der Kontakttable), so kennt der Nachfolger das gesuchte Anfrageergebnis und wird danach gefragt. Sonst leitet der aktuelle Knoten die Anfrage an den Knoten aus seiner Kontakttable weiter, welcher die größte Identifikationsnummer besitzt, die noch kleiner oder gleich der Identifikationsnummer des gesuchten Schlüssels ist. Es kann gezeigt werden, dass die Anzahl der Weiterleitungen mit Hilfe dieses Algorithmus logarithmisch in der Anzahl der Knoten im System ist.

*Beispiel:* Sei Knoten 3 aus Abb. 4 auf der Suche nach einem Datenobjekt, dessen Schlüssel die Identifikationsnummer 15 besitzt. Aus Sicht von Knoten 3 ist Knoten 13 der Kontakt aus seiner Kontakttable, der dem Wert 15 am nächsten kommt, aber noch kleiner als 15 ist. Also leitet er die Anfrage an Knoten 13 weiter. Dieser weiß, dass die gesuchte Identifikationsnummer zwischen ihm und seinem direkten Nachfolger Knoten 0 liegt. Die Anfrage wird also an Knoten 0 weitergeleitet. Dieser schickt schließlich das Anfrageergebnis direkt an Knoten 3 zurück. ■

**Baumförmiger Schlüsselraum:** Tapestry [ZKJ01] und Pastry [RoD01] sind strukturierte Peer-to-Peer Systeme, bei welchen der Schlüsselraum ein Plaxton-Netz [PRR97] beschreibt. Im Folgenden soll exemplarisch für diese Art des Schlüsselraums Tapestry betrachtet werden. Wie bei Chord wird bei Tapestry jedem Knoten und jedem Datenobjekt eine Identifikationsnummer der Länge  $m$  zugeordnet. Das Bestimmen der Identifikationsnummern für die Knoten erfolgt durch Anwendung einer Hash-Funktion auf die Adresse. Das Bestimmen der Identifikationsnummern der Datenobjekte erfolgt durch Anwendung einer Hash-Funktion auf den Schlüssel.

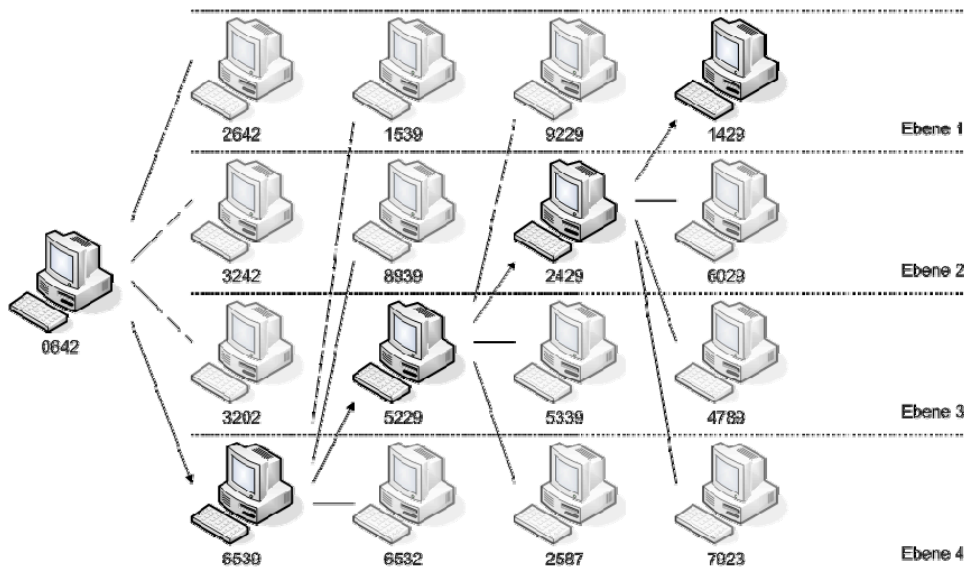
Anders als bei Chord werden Knoten und Datenobjekte nicht in einem Ring sondern einem Baum organisiert. Auch hier werden zur Bestimmung der konkreten Struktur die Identifikationsnummern der Knoten genutzt. Wie bei Chord organisiert jeder Knoten seine Kontakte in einer Kontakttable. Diese Kontakttable besitzt  $m$  verschiedene Ebenen  $l$ , mit  $0 \leq l < m$ . Die Einträge einer Ebene stimmen an den  $(l-1)$ -letzten Stellen mit der Identifikationsnummer des Knotens überein. An der Position  $l$  steht ein Wert aus dem Alphabet der Identifikationsnummer. Alle Einträge einer Ebene unterscheiden sich nur durch den Wert an dieser Position. Die übrigen Stel-

len der Einträge werden mit Platzhaltern aufgefüllt. Sofern es einen Knoten im System gibt, dessen Identifikationsnummer sich mit Hilfe eines Eintrags in der Kontakttabelle ausdrücken lässt, so verweist der Eintrag auf diesen Kontakt, andernfalls wird der Eintrag aus der Liste entfernt.

<i>Ebene 1</i>	<b>0642</b>	1642	2642	3642	4642	5642	6642	7642	8642	9642
<i>Ebene 2</i>	*042	*142	*242	*342	*442	*542	*642	*742	*842	*942
<i>Ebene 3</i>	**02	**12	**22	**32	**42	**52	**62	**72	**82	**92
<i>Ebene 4</i>	***0	***1	***2	***3	***4	***5	***6	***7	***8	***9

**Tab. 1: Maximale Kontakttabelle von Knoten 0642 (vgl. [ZKJ01])**

*Beispiel:* Tab. 1 zeigt die maximale Kontakttabelle des Knotens mit der Identifikationsnummer 0642. D.h. die abgebildete Tabelle enthält einen Eintrag für jede mögliche Position der Kontakttabelle. Die Kontakttabelle besitzt vier Ebenen. Für die Identifikationsnummern im Beispiel werden Dezimalzahlen angenommen, daher besitzt jede Ebene (maximal) 10 Einträge. Jeder Eintrag der Kontakttabelle verweist auf einen Knoten, dessen Identifikationsnummer dem Eintrag entspricht. D.h. Der Eintrag ‚2642‘ auf Ebene 1 verweist auf den Knoten mit der Identifikationsnummer 2642. Der Eintrag ‚\*\*02‘ auf Ebene 3 verweist auf einen Knoten, dessen ID mit den Ziffern ‚02‘ endet, z.B. ‚3202‘. Existiert kein Knoten mit der ID ‚9642‘, so verweist der entsprechende Zeiger ins Leere. ■



**Abb. 5: Bearbeitung der Anfrage ‚1429‘ ausgehend von Peer ‚0642‘**

Das Vorgehen zum Ablegen von Datenobjekten ist gleich dem Vorgehen beim Abfragen der Datenobjekte. Hierbei sucht der einfügende Knoten in seinem Verzeichnis von Kontakten den Knoten, dessen Identifikationsnummer mit den meisten letzten Stellen der Identifikationsnummer des Schlüssels übereinstimmt. Dieser Knoten leitet die Anfrage dann iterativ weiter, bis ein Knoten keinen Knoten mehr findet, an den die Anfrage weitergeleitet werden kann. Dieser speichert das Datenobjekt im Fall des Einfügens oder gibt es im Fall einer Anfrage zurück.

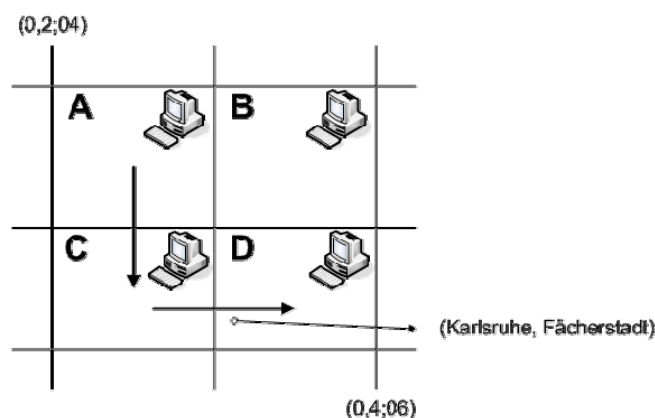
*Beispiel:* Abb. 5 zeigt die Bearbeitung der Anfrage ‚1429‘ ausgehend von Knoten ‚0642‘. Knoten ‚0642‘ erkennt, dass seine Identifikationsnummer an keiner Stelle mit der gesuchten Anfrage ‚1429‘ übereinstimmt. D.h. die gesuchte Identifikationsnummer und die Identifikationsnummer des Knotens unterscheiden sich schon in der letzten Stelle. Folglich leitet er die Anfrage an den

Knoten ‚6539‘ auf Ebene 4 seines Kontaktverzeichnisses weiter. Dieser erkennt die Übereinstimmung mit der Anfrage auf der letzten Stelle und sucht folglich den nächsten Zielknoten auf Ebene 3 seines Verzeichnisses der Kontakte. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis Knoten ‚1429‘ erreicht wird, der das Anfrageergebnis besitzt. Dieser schickt das Ergebnis an Knoten ‚0642‘ zurück. ■

**Torusförmiger Schlüsselraum:** Eine weitere Art von strukturierten Peer-to-Peer Netzwerken sind inhaltsadressierbare Netze (engl. Content Addressable Networks) [RFH01]. Im Unterschied zu Chord und Tapestry werden in inhaltsadressierbaren Netzen keine Identifikationsnummern für Knoten und Datenobjekte bestimmt. Hier werden die Schlüssel mit Hilfe einer Hash-Funktion auf d-dimensionale Koordinaten abgebildet. Die Menge aller möglichen Schlüssel spannt den Schlüsselraum, einen d-dimensionalen kartesischen Raum (auch Hypertorus), auf. Der Schlüsselraum wird schließlich unter den Knoten aufgeteilt.

*Beispiel:* Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt eines 2-dimensionalen inhaltsadressierbaren Netzwerks. Die vier dargestellten Knoten verwalten jeweils einen gleichgroßen Ausschnitt des Schlüsselraums. Knoten A verwaltet den Bereich  $(0,2;0,4) - (0,3;0,5)$ , Knoten B den Bereich  $(0,3;0,4) - (0,4;0,5)$ , usw. Das (Schlüssel; Wert)-Paar (Karlsruhe, Fächerstadt) wird durch Anwendung einer Hash-Funktion auf den Schlüssel ‚Karlsruhe‘ auf die Koordinate  $(0,31;0,58)$  abgebildet. Diese Koordinate liegt im Ausschnitt des Schlüsselraums, der von Knoten D verwaltet wird. ■

Neben den Datenobjekten in seinem Schlüsselraum kennt jeder Knoten alle anderen Knoten, die angrenzende Zonen verwalten, sowie den Bereich des Schlüsselraums, den diese verwalten. Ist ein Knoten an einem Datenobjekt interessiert, so berechnet er für den Schlüssel seiner Anfrage zunächst die Koordinate, auf welcher das Datenobjekt gespeichert ist, den Anfragepunkt. Dann berechnet er die Distanz zwischen dem Anfragepunkt und all seinen Kontakten. Die Anfrage wird dann an den Kontakt weitergeleitet, welcher dem Anfragepunkt am nächsten ist. Dieses Verfahren wird iterativ wiederholt, bis die Anfrage den Knoten erreicht, welcher das Anfrageergebnis kennt. Dieser schickt das Anfrageergebnis dann an den Absender zurück.



**Abb. 6: Inhaltsadressierbares Netzwerk**

*Beispiel:* Sei Knoten A in Abb. 6 an Informationen zur Stadt Karlsruhe interessiert. So berechnet er zunächst die Koordinaten für den Schlüssel ‚Karlsruhe‘ mit Hilfe der Hash-Funktion. Diese Koordinaten sind  $(0,31;0,58)$ . Im nächsten Schritt wird die Distanz der Kontakte zu diesem Punkt berechnet. Offensichtlich ist Knoten C näher am Anfragepunkt, daher wird die Anfrage an Knoten C weitergeleitet. Dieser nutzt dasselbe Vorgehen und leitet die Anfrage an Knoten D weiter. Dieser bestimmt das Anfrageergebnis und schickt es an den Anfragenden, hier Knoten 3, zurück. ■

**Weitere Ausprägungen:** Neben den oben genannten strukturierten Peer-to-Peer Systemen wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl weiterer solcher Systeme entwickelt. Ziel dieser Systeme ist es, bei konstanter Anzahl der Kontakte (wie im CAN) eine Anzahl von Weiterleitungen zu erreichen, die logarithmisch in der Anzahl der Knoten ist (wie bei Tapestry und Chord). Viceroy [MNR02] war der erste Ansatz, der dieses Ziel erfüllte. Viceroy basiert auf so genannten Butterfly Networks [Col02]: Hier werden die einzelnen Knoten auf Ringen angeordnet. Jeder Knoten kennt neben dem Vorgänger und dem Nachfolger auf seinem Ring, einen Knoten auf einem untergeordneten und einen Knoten auf einem übergeordneten Ring. Anfragen werden hier zunächst an den Knoten im äußersten Ring und von diesem dann wieder zu den inneren Ringen geleitet. Einige spätere Systeme basieren auf de Bruijn Graphen [Bru46]. Auch hier wird bei konstanter Kontaktzahl logarithmischer Weiterleitungsaufwand erreicht [LKR03]. Es existieren verschiedene Erweiterungen der in diesem Abschnitt eingeführten strukturierten Peer-to-Peer Systeme um de Bruijn Graphen. So ist Koorde [KaK03] eine de Bruijn-Erweiterung von Chord oder CAN-D2B [FrG06] eine entsprechende Erweiterung von CAN. Bei derartigen Systemen wird jedem Knoten eine eindeutige Identifikationsnummer zugewiesen. Kontakte eines Knoten sind dann genau die Knoten, deren Identifikationsnummer mit den letzten  $m-1$  Stellen des Ausgangsknotens beginnen oder mit den ersten  $m-1$  Stellen des Ausgangsknotens enden. Dabei ist  $m$  die Anzahl der Stellen der Identifikationsnummer. Anfragen in diesen Systemen werden über die Identifikationsnummern der Knoten weitergeleitet: Ein Knoten leitet die Anfrage an den seiner Kontakte weiter, der an der ersten Stelle mit der Identifikationsnummer des gesuchten Datenobjekts übereinstimmt. Beim Eintreffen einer Nachricht wird die gesuchte Identifikationsnummer zunächst um eine Stelle nach links verschoben. Anschließend wird das Verfahren iterativ fortgeführt.

**Bewertung:** Die bei strukturierten Peer-to-Peer Systemen genutzten Datenstrukturen zur Organisation der Knoten haben zwei wesentliche Eigenschaften: Erstens, speichert jeder Knoten nur eine kleine Anzahl von Kontakten. Dabei kennt er seine direkte Nachbarschaft (also die Knoten in seiner „Nähe“) besser, während er nur wenige weiter entfernte Knoten kennt. Zweitens, enthält die Kontakttafel nicht genug Informationen, um die Daten zu jedem gegebenen Schlüssel direkt zu bestimmen.

Die in der Literatur vorgestellten strukturierten Peer-to-Peer Systeme unterscheiden sich hauptsächlich in der Wahl des Verfahrens zum Weiterleiten von Anfragen und der Wahl der Kontakte [GGG03]. Daraus ergeben sich die folgenden drei Klassifikationsmerkmale: (1) Die Anzahl der Kontakte, die jeder Knoten besitzt. (2) Die Anzahl der Weiterleitungen, die notwendig sind um ein Anfrageergebnis zu bestimmen. (3) Die Art der Verbindungen. Bei einigen Systemen sind die Verbindungen bilateral, d.h. ein Knoten ist immer auch ein Kontakt seiner Kontakte. Bei anderen Systemen sind die Verbindungen unilateral, d.h. der Kontakt eines Knotens kennt den Knoten selbst nicht.

Die frühen strukturierten Peer-to-Peer Systeme erreichen entweder einen Weiterleitungsaufwand logarithmisch in der Anzahl der Teilnehmer (Chord, Tapestry und Pastry) oder eine von der Anzahl der Teilnehmer unabhängige Anzahl von Kontakten (CAN). Spätere Systeme (Viceroy, Koorde und CAN-D2B) erreichen beides. Aus dieser Perspektive sind die späteren Systeme den frühen Realisierungen vorzuziehen. Allerdings nutzen Viceroy, Koorde und CAN-D2B nur unilaterale Verbindungen zu ihren Kontakten. Im CAN sind alle Verbindungen immer bilateral. Auch Tapestry und Pastry lassen sich so erweitern, dass die Verbindungen bilateral sind: Für alle Kontakte auf Ebene 1 des Verzeichnisses der Nachbarn gilt dies offensichtlich. Alle Knoten, die sich nur in der ersten Stelle unterscheiden, kennen sich laut der Definition des Verzeichnisses der Nachbarn immer. Für alle übrigen Level lassen sich bilaterale Verbindungen

sicherstellen: Hierfür muss jeder Knoten  $A$  im Verzeichnis der Nachbarn aller seiner Kontakte  $B$  liegen. Außerdem muss die Ebene  $l$ , in der  $B$  bei  $A$  liegt, gleich der Ebene sein, in der  $A$  bei  $B$  liegt. Für Chord hingegen ist der Aufbau bilateraler Verbindungen nicht möglich. Tab. 2 fasst die Ergebnisse bezüglich Zahl der Kontakte, Weiterleitungsaufwand und Art der Verbindungen zusammen.

	Anzahl der Kontakte	Weiterleitungsaufwand	Art der Verbindung
<b>Ringförmiger Schlüsselraum</b>			
Chord [SMK03]	logarithmisch	logarithmisch	unilateral
<b>Baumförmiger Schlüsselraum</b>			
Tapestry [ZKJ01]	logarithmisch	logarithmisch	unilateral / bilateral
Pastry [RoD01]	logarithmisch	logarithmisch	unilateral / bilateral
<b>Torusförmiger Schlüsselraum</b>			
CAN [RFH01]	konstant	Wurzel	bilateral
<b>Butterfly Netzwerk</b>			
Viceroy [MNR02]	konstant	logarithmisch	unilateral
<b>de Bruijn Graphen</b>			
Koorde [KaK03]	konstant	logarithmisch	unilateral
CAN-D2B [FrG06]	konstant	logarithmisch	unilateral

Tab. 2: Vergleich verschiedener strukturierter Peer-to-Peer Systeme

## 2.2 Spieltheorie

Komplexe Systeme, wie Systemarchitekturen, in denen mehrere Teilnehmer miteinander interagieren, lassen sich mit Hilfe der Spieltheorie formal untersuchen. Solche Systeme werden dabei als Spiele aufgefasst, in welchen die Teilnehmer oder Spieler Entscheidungen treffen. Dabei wird versucht, das Verhalten jedes Teilnehmers zu modellieren. Mit Hilfe der Verhaltensmodelle lässt sich ein Zustand bestimmen, in welchem die Teilnehmer kein Interesse daran haben ihre Strategie zu ändern. Ein solcher Zustand des Systems wird als Gleichgewicht bezeichnet. Im Folgenden wird ein Überblick über einige spieltheoretische Grundbegriffe gegeben, die in dieser Arbeit genutzt werden. Die folgende Einführung sowie die deutschen Bezeichnungen folgen dem Lehrbuch von Berninghaus et al. [BEG04].

Zur spieltheoretischen Modellierung wird zunächst die Menge der Spieler  $I = \{1, \dots, n\}$  festgelegt. Dabei werden die Akteure als Spieler bezeichnet, die während des Spiels eine Strategie  $s_i$  wählen. Der Strategieraum  $\Sigma_i$  beschreibt alle strategischen Möglichkeiten eines Spielers  $i \in I$ . Der Strategieraum  $\Sigma_i$  setzt sich aus mehreren reinen Strategien  $s_i$  zusammen. Das Ergebnis der Strategiewahl aller Spieler wird als Strategieprofil

$$s = (s_1, \dots, s_n) \in \Sigma = \Sigma_1 \times \dots \times \Sigma_n$$

bezeichnet. Bei der Wahl der eigenen Strategie richtet sich Spieler  $i$  nach den Strategien seiner Mitspieler. Demnach ist der Einfluss der Strategieänderung eines Spielers  $i$  bei gleich bleibenden Strategien aller anderen Spieler interessant. Deshalb wird  $s_{-i}$  als Strategieprofil aller Spieler mit Ausnahme von Spieler  $i$  bezeichnet. Das Strategieprofil

$$s = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, \dots, s_n)$$

lässt sich damit auch als

$$s = (s_i, s_j)$$

beschreiben [FuT91]. Jedes Strategieprofil  $s$  beschreibt ein Spielergebnis, das jeder Spieler  $i$  gemäß seiner Auszahlungsfunktion  $v_i(s)$  bewertet. Mit Hilfe einer monoton steigenden Funktion kann der Wert der Auszahlungsfunktion dann auf den Nutzen eines Teilnehmers abgebildet werden.

*Beispiel (Gefangenendilemma [FuT91]):* Zwei Menschen sind eines Verbrechens beschuldigt und werden in unterschiedlichen Zellen festgehalten, um sich nicht unterhalten zu können. Die Polizei besitzt nicht ausreichend viele Beweise, um beide Verdächtigen überführen zu können. Folglich versucht sie die Spieler zu Geständnissen zu bewegen. Sie bietet daher den zwei Verdächtigen an, sie im Falle eines Geständnisses zu belohnen. Die Verdächtigen stehen nun vor der Entscheidung zu gestehen, also auf das Angebot einzugehen oder zu schweigen. Aus spieltheoretischer Sicht hat dieses Szenario  $n = 2$  Spieler: die zwei Verdächtigen. Die Polizei selbst ist kein Spieler, da sie keine relevante Entscheidung treffen kann. Die Menge der Spieler ist  $I = \{1, 2\}$ . Jeder Spieler hat zwei mögliche Strategien: Mit dem anderen Verdächtigen kooperieren (C), also nicht gestehen, oder defektieren (D), also gestehen. Der Strategieraum der Spieler  $i$  ist somit  $\Sigma_i = \{C, D\}$ . Gestehen beide nicht, so ist das Strategieprofil  $s = (C, C)$ . Für die Auszahlungsfunktion lassen sich nun Werte annehmen: Gesteht keiner, müssen die beiden Verdächtigen aus Mangel an Beweisen frei gelassen und für die Haft entschädigt werden. Für ihre Auszahlungsfunktion gilt  $v_1(s) = v_2(s) = 1$ . Gestehen beide, müssen sie zwar in Haft, werden aber für ihr Geständnis belohnt. Ihre Auszahlung ist dann  $v_1(s) = v_2(s) = 0$ . Gesteht dagegen nur Spieler 1 (Spieler 2) und der andere gesteht nicht, so wird der Geständige stark belohnt, für seine Auszahlungsfunktion gilt  $v_1(s) = 2$  ( $v_2(s) = 2$ ). Spieler 2 (Spieler 1) hingegen wird bestraft, für ihn gilt  $v_2(s) = -1$  ( $v_1(s) = -1$ ). ■

Mit Hilfe der eingeführten Begriffe lassen sich Entscheidungssituationen formalisieren. Um Vorhersagen bezüglich des Verhaltens der Teilnehmer treffen zu können, werden, wie eingangs bereits erwähnt, Gleichgewichte genutzt. Abhängig von der Art des Spiels haben sich unterschiedliche Gleichgewichtskonzepte bewährt. Im einfachsten Fall wird davon ausgegangen, dass die Spieler gleichzeitig, d.h. ohne Kenntnis der Züge der Anderen, genau eine Entscheidung treffen und das Spiel danach beendet ist. Solche Spiele werden im Folgenden als simultane Spiele bezeichnet. Dabei kennen die Teilnehmer sowohl ihre Auszahlungsfunktion, als auch die Auszahlungsfunktion der übrigen Spieler. Meist sind Spiele jedoch komplexer: Teilnehmer treffen ihre Entscheidungen nacheinander. Solche, so genannte dynamische Spielen [FuT91], werden nach den Informationen der Spieler klassifiziert: (1) Kennen die Teilnehmer die Auszahlungsfunktion der übrigen Spieler, so spricht man von vollständiger Information. (2) Kennen die Teilnehmer die Züge aller anderen Teilnehmer in der Vergangenheit, so spricht man von perfekter Information. Dabei wird zwischen Spielen, die endlich lange dauern, und unendlichen Spielen differenziert. Im Folgenden werden die hier motivierten Arten von Spielen vorgestellt und Gleichgewichtskonzepte eingeführt.

## 2.2.1 Simultane Spiele

Simultane Spiele mit zwei Spielern lassen sich mit Hilfe von Matrizen visualisieren (siehe Tab. 3) [FuT91]. Man spricht hierbei von Spielen in Normalform. Dabei entscheidet sich der Spieler „Zeile“ für die gespielte Zeile. Der andere Spieler, Spieler „Spalte“, entscheidet sich für die gespielte Spalte. Im entsprechenden Feld der Matrize wird dann die Auszahlung der Teilnehmer vermerkt. Dabei repräsentiert der erste Wert die Auszahlung des Spielers „Zeile“, während der zweite Wert die Auszahlung des Spielers „Spalte“ darstellt.

*Beispiel:* Das Gefangenendilemma aus dem vorangegangenen Beispiel lässt sich entsprechend als Matrix darstellen. Spieler 1 kann jetzt als Spieler „Zeile“ und Spieler 2 als Spieler „Spalte“ dargestellt werden (siehe Tab. 3). In der Matrix kann nun für jedes Strategieprofil die Auszahlung der Spieler abgelesen werden: Spielt Spieler 1 Alternative C und Spieler 2 Alternative D, so erhält Spieler 1 die Auszahlung -1 und Spieler 2 die Auszahlung 2. ■

	Aktion C	Aktion D
Aktion C	1, 1	-1, 2
Aktion D	2, -1	0, 0

**Tab. 3: Gefangenendilemma (vgl. [FuT91])**

## 2.2.2 Gleichgewichte in simultanen Spielen

Um die Gleichgewichte in simultanen Spielen zu bestimmen, lassen sich unterschiedliche Konzepte anwenden. Im Folgenden wird auf die zwei Konzepte eingegangen: die Eliminierung dominierter Strategien und das Nash-Gleichgewicht.

**Eliminierung dominierter Strategien:** Existiert eine Strategie  $s_i^0 \in \Sigma_i$ , deren Auszahlung  $v(s_{-i}, s_i^0)$  für alle möglichen Strategieprofile anderer Spieler  $s_{-i} \in \Sigma_{-i}$ , größer der Auszahlung  $v(s_{-i}, s_i)$  einer anderen Strategie  $s_i$  ist, so wird die Strategie  $s_i$  dominiert durch  $s_i^0$  [BEG04]. In diesem Fall ist es für den Spieler  $i$  niemals sinnvoll die dominierte Strategie  $s_i$  zu spielen. Bei der Bestimmung von Gleichgewichten kann folglich auf die Betrachtung dominierter Strategien verzichtet werden. Damit kann ein Spiel vereinfacht werden, indem sukzessive dominierte Strategien eliminiert werden. Bleibt für alle Spieler nach Eliminierung der dominierten Handlungsalternativen nur eine Alternative übrig, so spricht man von einem Gleichgewicht. ■

*Beispiel:* Mit Hilfe der Eliminierung dominierter Strategien kann für das Gefangenendilemma aus Tab. 3 das Gleichgewicht bestimmt werden [FuT91]. Dabei wird zunächst der Spieler „Zeile“ (Spieler 1) betrachtet. Wenn er gesteht (Strategie D spielt), ist seine Auszahlung unabhängig von der Strategie des Spielers „Spalte“ (Spieler 2) größer, als wenn er nicht gesteht (Strategie C spielt). Für Spieler 1 gilt also Strategie D dominiert Strategie C. Analog dominiert auch für Spieler 2 Strategie D Strategie C. Somit ist das Strategieprofil, indem alle Spieler Alternative D wählen, ein Gleichgewicht. ■

**Nash-Gleichgewicht:** Das Konzept des Nash-Gleichgewichts [Nas50] kann genutzt werden, um Gleichgewichte zu identifizieren. Ein Strategieprofil  $s^* = (s_1^*, \dots, s_n^*)$  ist ein Nash-Gleichgewicht, wenn für jede Strategie  $s_i \in \Sigma_i$  eines jeden Spielers  $i \in I$  gilt [BEG04]:

$$v(s_{-i}^*, s_i^*) \geq v(s_{-i}^*, s_i)$$

Man spricht demnach von einem Nash-Gleichgewicht, wenn in einem Strategieprofil  $s^*$  kein Teilnehmer seine Auszahlung erhöhen kann, indem er von seiner Strategie  $s_i^*$  abweicht. Viele Spiele besitzen mehrere Nash-Gleichgewichte. In diesem Fall hängt die Wahl des Gleichgewichtes davon ab, welches Gleichgewicht die Teilnehmer erwarten [Fut91].

	Aktion C	Aktion D
Aktion C	1, 2	0, 0
Aktion D	0, 0	2, 1

**Tab. 4: Kampf der Geschlechter (vgl. [FuT91])**

*Beispiel (Kampf der Geschlechter [FuT91]):* Ein befreundetes Paar plant die Beschäftigung für einen Samstag. Dabei stehen für beide Partner nur zwei Alternativen zur Auswahl: Ein Casino besuchen (Alternative C) und in die Disco gehen (Alternative D). Beide Partner sind getrennt voneinander in der Stadt und müssen die für sich passende Karte kaufen. Sie haben sich im Vorfeld nicht über die Beschäftigung an diesem Samstag unterhalten und können sich auch jetzt nicht abstimmen. Der weibliche Partner (Spieler „Zeile“) bevorzugt den Besuch der Disco, während der männliche Partner (Spieler „Spalte“) lieber das Casino besuchen würde. Beide möchten aber auf keinen Fall getrennt vom Partner eine der beiden Veranstaltungen besuchen. Die Spieler  $i$  besitzen somit den Strategieraum  $\Sigma_i = \{C, D\}$  und die in Tab. 4 visualisierte Auszahlungsmatrix. Durch systematisches Prüfen aller Strategieprofile kann nun das Gleichgewicht bestimmt werden: Gegeben Spieler „Spalte“ spielt Strategie C, so ist es für Spieler „Zeile“ optimal auch Strategie C zu spielen. Seine Auszahlung ist mit 1 höher als 0. Spielt Spieler „Spalte“ hingegen Strategie D, so ist die Wahl von Strategie D für Spieler „Zeile“ optimal. Hier erhält er eine Auszahlung von 2, verglichen mit einer Auszahlung von 0, wenn er Strategie D wählt. Dasselbe gilt analog für Spieler „Spalte“. Somit existieren in diesem Spiel zwei Nash-Gleichgewichte: Im ersten Gleichgewicht spielt Spieler „Zeile“ Alternative C und Spieler „Spalte“ Alternative D, im Zweiten spielt Spieler „Zeile“ Alternative D und Spieler „Spalte“ Alternative C. ■

### 2.2.3 Endliche Spiele

In den bisher betrachteten Spielen treffen alle Spieler ihre Entscheidungen simultan. Das ist oft nicht realistisch. Treffen Spieler ihre Entscheidungen nacheinander, so lassen sich diese aber nicht mehr mittels einer Matrix darstellen. In diesem Fall wird die Darstellung eines Spiels als Entscheidungsbaum (siehe Abb. 7) gewählt [BEG04]. Entsprechende Spiele werden als Spiele in Extensivform bezeichnet. Jeder Entscheidungsbaum ist dabei beschrieben durch die Knotenmenge  $K$ . Dabei besteht  $K$  aus einer Menge von Blattknoten  $Z$  und einer Menge von Entscheidungsknoten  $X := K - Z$ .

In jedem Entscheidungsknoten  $X$  trifft einer der Spieler eine Entscheidung, während jeder Blattknoten den Ausgang eines speziellen Spielverlaufs darstellt. Für jedes Spiel existiert eine Spielzerlegung  $P = \{P_1, \dots, P_n\}$  aller Entscheidungsknoten  $X$ , so dass jedes  $P_i$  genau die Knoten des Spielbaums umfasst, an welchen der Spieler  $i$  eine Entscheidung trifft.

Jede Folge von Entscheidungen der Spieler, die in der Wurzel des Entscheidungsbaums beginnt und an einem Blattknoten  $z \in Z$  endet, beschreibt einen möglichen Spielverlauf und wird als Pfad bezeichnet. Dabei charakterisiert jeder Blattknoten  $z$  genau einen Pfad. Für jeden Pfad kann ein Auszahlungsvektor bestimmt werden, dessen Komponenten die Auszahlungen der einzelnen Spieler widerspiegeln.

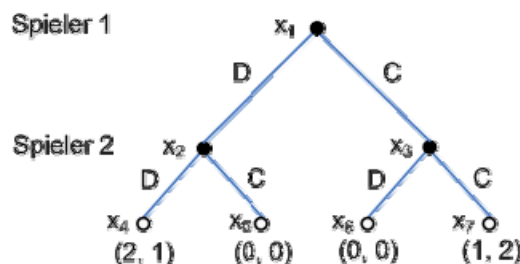


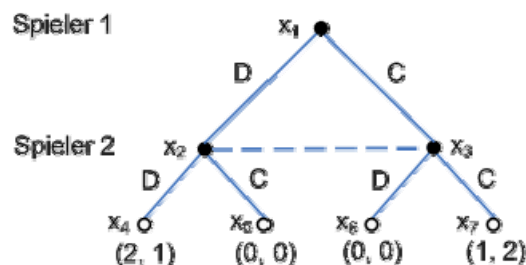
Abb. 7: Spiel als Entscheidungsbaum



*Beispiel (vgl. [BEG04]):* Abb. 7 zeigt ein Spiel als Entscheidungsbaum ähnlich dem Spiel „Kampf der Geschlechter aus Tab. 4. In diesem Entscheidungsbaum besteht die Knotenmenge  $K = \{x_1, \dots, x_7\}$  aus allen Knoten des Baums. Die Menge der Blattknoten  $Z$  ist  $\{x_4, \dots, x_7\}$ . Die Menge der Entscheidungsknoten  $X = K - Z$  ist  $\{x_1, x_2, x_3\}$ . Für die Spielzerlegung gilt  $P = \{P_1, P_2\}$  mit  $P_1 = \{x_1\}$  und  $P_2 = \{x_2, x_3\}$ . Der Auszahlungsvektor im Blattknoten  $x_4$  ist  $(2, 1)$ . Spieler 1 erhält also eine Auszahlung von 2, während Spieler 2 die Auszahlung 1 bekommt. ■

Sind die Spieler in einem Spiel nicht über die Entscheidungen der anderen Spieler in der Vergangenheit informiert, so spricht man von Spielen mit unvollkommener Information [FuT91]. In Spielen mit unvollkommener Information kann der einzelne Spieler seine Position im Spielbaum nicht exakt bestimmen. Solche Spiele können durch Informationsmengen  $u_{ik}$  modelliert werden [BEG04]. Dafür wird die Spielzerlegung  $P_i$  des Spielers  $i$  in genau die Mengen  $u_{ik}$  zerlegt, welche die Informationen des Spielers  $i$  zu einer bestimmten Stufe des Spiels  $k$  beschreiben. Alle Informationsmengen eines Spielers bilden zusammen die Informationspartition  $U_i = \{u_{i1}, \dots, u_{in}\}$ , mit  $I = |U_i|$ . Ist  $u_{ik}$  einelementig, so besitzt Spieler  $i$  vollkommene Information über die vorangehenden Züge. Informationsmengen lassen sich im Entscheidungsbaum visualisieren, indem eine gestrichelte Linie zwischen allen Entscheidungsknoten einer Informationsmenge gezeichnet wird (siehe Abb. 8).

*Beispiel (vgl. [BEG04]):* Die Informationspartitionen der Spieler im Spiel aus Abb. 7 sind  $U_1 = \{u_{11}\}$  und  $U_2 = \{u_{21}, u_{22}\}$  mit  $u_{11} = \{x_1\}$ ,  $u_{21} = \{x_2\}$  und  $u_{22} = \{x_3\}$ . Alle Informationsmengen sind damit einelementig, in dem beschriebenen Spiel besteht vollkommene Information. Das Spiel lässt sich aber leicht in ein Spiel mit unvollkommener Information erweitern: Hierfür muss nur sichergestellt werden, dass Spieler 2 nicht weiß, ob Spieler 1 Handlungsalternative D oder Handlungsalternative C gewählt hat. Abb. 8 zeigt den entsprechenden Entscheidungsbaum. Die Informationspartition des Spielers 2 ist nun  $U_2 = \{u_{21}\}$  mit der Informationsmenge  $u_{21} = \{x_2, x_3\}$ . ■



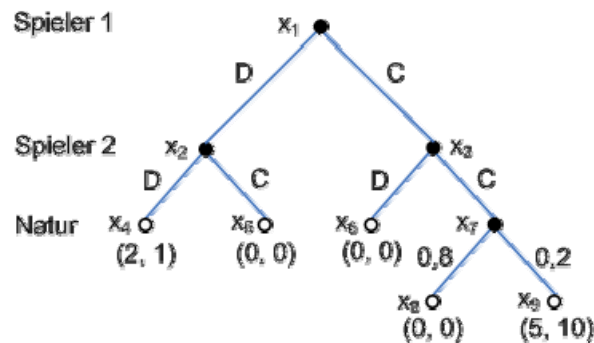
**Abb. 8: Spiel als Entscheidungsbaum mit unvollkommener Information**

Abhängig von der Informationsmenge  $u_{ik} \in U_i$ , in der sich der Spieler gerade befindet kann er unterschiedliche Handlungsalternativen wählen [BEG04]. Die Menge der verfügbaren Handlungsalternativen wird Aktionsmenge  $C_{u_{ik}}$  genannt. Mit Hilfe der Aktionsmengen lässt sich eine Strategie  $\phi_i$  in einem Extensivformspiel beschreiben. Eine Strategie  $\phi_i$  ordnet jeder Informationsmenge  $u_{ik}$  eine Aktion aus der Aktionsmenge  $C_{u_{ik}}$  zu.

*Beispiel:* Im Entscheidungsbaum aus Abb. 8 sind die Aktionsmengen  $C_{u_{11}} = C_{u_{21}} = \{C, D\}$  in beiden Informationsmengen. Beide Spieler können demnach zwischen den Strategien C und D wählen. Eine mögliche Strategie  $\phi_1$  für Spieler 1 ist das Wählen von C in Informationsmenge  $u_{11}$ . Spieler 2 könnte eine Strategie  $\phi_2$  wählen, in der er Aktion D in Informationsmenge  $u_{21}$  durchführt. ■

Bei den bisherigen Ausführungen wurde davon ausgegangen, dass die Konsequenzen der einzelnen Ereignisse sicher sind (Spiele mit vollständiger Information). Sind die Auszahlungen der

Spieler während des Spiels jedoch noch nicht bekannt, so müssen die Spieler Annahmen über die Auszahlung treffen. Entsprechende Spiele werden als Spiele mit unvollständiger Information bezeichnet. Entsprechende Annahmen werden mit Hilfe eines Zufallsspielers, dem Spieler „Natur“, modelliert (siehe Abb. 9) [BEG04]. Dieser Spieler wählt unterschiedliche Handlungsalternativen mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten.



**Abb. 9: Spiel als Entscheidungsbaum mit unvollständiger Information**

*Beispiel:* Abb. 9 zeigt eine Modifikation des Spiels aus Abb. 7. Nachdem beide Spieler Handlungsalternative D gewählt haben, findet nun ein Zufallszug des Spielers Natur statt. In diesem Zug wird die Auszahlung festgelegt. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit des Auszahlungsvektors (0, 0) gleich 80% und die Wahrscheinlichkeit des Auszahlungsvektors (5, 10) gleich 20%. ■

## 2.2.4 Gleichgewichte in endlichen Spielen

Im Folgenden werden unterschiedliche Lösungskonzepte zur Bestimmung von Gleichgewichten in dynamischen Spielen vorgestellt. Dabei wird zunächst auf die Bestimmung von Nash-Gleichgewichten und deren Nachteile in dynamischen Spielen eingegangen. Dann werden sowohl teilspielperfekte Gleichgewichte als auch sequentielle Gleichgewichte als Lösungskonzepte vorgestellt, welche die Probleme des Nash-Gleichgewichts lösen.

**Nash-Gleichgewichte:** In dynamischen Spielen mit zwei Spielern können Gleichgewichte bestimmt werden, indem das Spiel aus der Extensivform auf die vom Spiel induzierte Normalform abgebildet wird [BEG04]. Dadurch wird die Menge der Strategien  $\Phi_i$  des Spielers  $i$  im Extensivformspiel als die Menge der Strategien  $s_i$  im Normalformspiel betrachtet. Die Auszahlungen im Normalformspiel lassen sich bestimmen, indem für jede mögliche Kombination von Strategien  $\Phi = \{\Phi_1, \dots, \Phi_n\}$  die Auszahlung im Blattknoten  $z$  des Spielbaums ermittelt wird. In so ermittelten Normalformspiel werden Nash-Gleichgewichte analog zum Vorgehen in simultanen Spielen bestimmt.

*Beispiel:* Abb. 10 a) zeigt ein Spiel in Extensivform. Das Spiel besitzt zwei einelementige Informationsmengen  $u_{11} = \{x_1\}$  und  $u_{21} = \{x_2\}$ . Die Aktionsmengen umfassen in beiden Informationsmengen die Aktionen C und D. Beide Spieler können folglich aus zwei Strategien (Aktion C und Aktion D) wählen. Abb. 10 b) visualisiert dies. Die möglichen Strategien beschreiben die Zeilen- und Spaltenüberschriften. Für jede mögliche Strategiekombination werden die Auszahlungen bestimmt, indem der Entscheidungsbaum von der Wurzel aus durchlaufen wird. So ergibt beispielsweise das Spielen von D durch Spieler 1 und das Spielen von C durch Spieler 2 die Auszahlung (0, 0) im Blattknoten. Die induzierte Normalform in Abb. 10 b) spiegelt dies wieder. Die Nash-Gleichgewichte lassen sich nun in der induzierten Normalform bestimmen. Es existieren

zwei solche Nash-Gleichgewichte, eines indem beide Spieler Aktion C wählen und eines, indem beide Aktion D spielen. ■

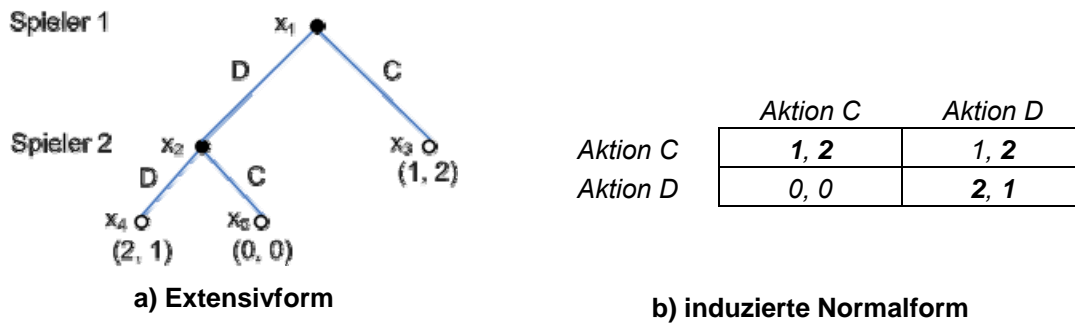


Abb. 10: Spiel in Extensivform und induzierte Normalform

**Teilspielperfektes Gleichgewicht:** Das Spiel aus dem vorangegangenen Beispiel illustriert einen Nachteil der Nash-Gleichgewichte in Extensivformspielen: Spielen beide Teilnehmer Aktion C, so wird zwar ein Gleichgewicht erreicht, dieses Gleichgewicht ist jedoch nicht plausibel: Da die Spieler ihre Entscheidungen nacheinander treffen, kann Spieler 1 davon ausgehen, dass Spieler 2, wenn er am Zug ist, Handlungsalternative D wählt. Damit ist es für Spieler 1 nicht sinnvoll eingangs Aktion C zu wählen: Er kann mit einer höheren Auszahlung durch Wahl von Aktion D rechnen.

Ein Gleichgewichtskonzept, welches solche unplausible Gleichgewichte ausschließt ist das teilspielperfekte Gleichgewicht [Sel65]. Dafür wird nicht nur der gesamte Spielbaum, sondern jedes im Spielbaum enthaltene Teilspiel betrachtet [BEG04]. Ein Teilspiel ist dabei ein Spiel in Extensivform, das an einem Entscheidungsknoten  $x \in X$  beginnt.

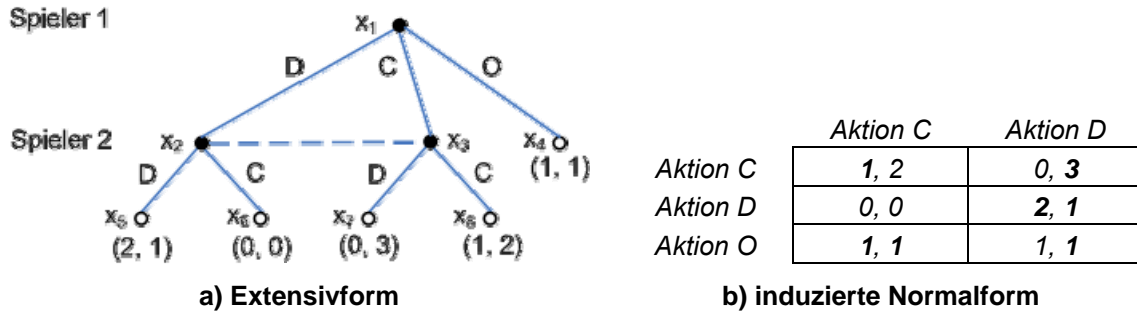
Ein Strategieprofil ist dann ein teilspielperfektes Gleichgewicht, wenn es in jedem Teilspiel, ein Nash-Gleichgewicht erzeugt.

*Beispiel:* Im Beispiel aus Abb. 10 existieren zwei Nash-Gleichgewichte, eines indem beide Spieler Strategie C spielen, und eines, in dem beide Strategie D spielen. Das Nash-Gleichgewicht (C, C) ist jedoch nicht teilspielperfekt: Ausgehend von Knoten  $x_2$  existiert ein Teilspiel. In diesem Teilspiel kann nur Spieler 2 eine Entscheidung treffen. Für ihn ist es rational, Strategie D zu spielen. Damit ist die Wahl von D kein Gleichgewicht im Teilspiel, das Nash-Gleichgewicht (C, C) folglich kein teilspielperfektes Gleichgewicht. ■

Teilspielperfekte Gleichgewichte lassen sich mit Rückwärtsinduktion bestimmen. Dabei werden beginnend an den Blattknoten des Entscheidungsbaums immer die Entscheidungen gewählt, die unabhängig von den vorhergehenden Entscheidungen für den aktuell handelnden Spieler optimal sind. So kann rekursiv für jeden Knoten die optimale Handlungsalternative identifiziert werden.

*Beispiel:* Im Beispiel aus Abb. 10 kann das teilspielperfekte Gleichgewicht mit Hilfe von Rückwärtsinduktion gefunden werden. Für Spieler 2 ist es im Knoten  $x_2$  optimal Aktion D zu spielen. Mit diesem Wissen lässt sich die optimale Entscheidung von Spieler 1 in Entscheidungsknoten  $x_1$  bestimmen. Er kann zwischen einer Auszahlung von 2 bei Wahl der Strategie D und einer Auszahlung von 1 bei Spielen der Strategie C entscheiden. Folglich entscheidet er sich für Strategie D. Damit ist das Strategieprofil (D, D) ein teilspielperfektes Gleichgewicht. ■

**Sequentielles Gleichgewicht:** Das Konzept des teilspielperfekten Gleichgewichts kommt bei Spielen mit unvollkommener Information an seine Grenzen, da bei der Erstellung von Teilspielen keine Informationsmenge zerteilt werden darf [BEG04]. Somit kann es bei Spielen mit unvollkommener Information passieren, dass unplausible Gleichgewichte zugelassen werden. Ein Gleichgewichtskonzept, das diesen Nachteil nicht bietet, ist das sequentielle Gleichgewicht [KrW82].



**Abb. 11: Spiel in Extensivform mit Aktion O (vgl. [BEH04])**

*Beispiel (vgl. [BEH04]):* Abb. 11 zeigt ein Spiel mit zwei Spielern. Dieses Spiel lässt keine Teilspiele zu, da bei Teilspielen beginnend in  $x_2$  oder  $x_3$  die Informationsmenge  $u_{21} = \{x_2, x_3\}$  zerschnitten werden müsste. Jedes Nash-Gleichgewicht in diesem Spiel ist auch ein teilspielperfektes Gleichgewicht. Somit ist das Strategieprofil (O, C) ein teilspielperfektes Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht ist jedoch nicht plausibel: Spieler 1 kann die Wahl von D durch Spieler 2 antizipieren. Damit ist es für ihn rational, nicht O sondern D zu spielen. ■

Dem sequentiellen Gleichgewicht liegt die Idee zu Grunde, dass jeder Spieler  $i$  innerhalb einer Informationsmenge jedem möglichen Entscheidungsknoten eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnet [BEH04]. Diese Wahrscheinlichkeit wird Überzeugung  $\rho_i$  genannt. Jeder Spieler passt diese Wahrscheinlichkeit an seine Beobachtungen des Spiels an. Ein sequentielles Gleichgewicht ist erreicht, wenn die folgenden zwei Eigenschaften erfüllt sind [KrW82]:

1. *Sequentielle Rationalität:* Gegeben ein Strategieprofil im Gleichgewicht und eine Menge von Überzeugungen, so kann kein Teilnehmer seine Auszahlung erhöhen, indem er von seiner Strategie abweicht.
2. *Konsistenz:* Die Überzeugung der Spieler stimmen mit ihren Beobachtungen überein.

Sind sowohl sequentielle Rationalität als auch Konsistenz in einem Spiel für eine Menge von Strategieentscheidungen und Überzeugungen erfüllt, so beschreiben diese Strategieentscheidungen und die Überzeugungen ein sequentielles Gleichgewicht.

*Beispiel:* Im vorangegangenen Beispiel wurde für das Spiel aus Abb. 11 erläutert, dass das Strategieprofil (O, D) ein unplausibles teilspielperfektes Gleichgewicht beschreibt. Dieses Gleichgewicht ist jedoch kein sequentielles Gleichgewicht: Die Wahl von D durch Spieler 2 für keine Menge von Überzeugungen rational, da Aktion D von Aktion C dominiert wird. Das Strategieprofil (D, D) hingegen ist ein sequentielles Gleichgewicht. Die Überzeugungen  $\rho_i(x_2) = 1$  und  $\rho_i(x_3) = 0$  sind sowohl sequentiell rational als auch konsistent mit (D, D). ■

## 2.2.5 Unendliche Spiele

In den bisher betrachteten Spielen war stets das Ende des Spiels bekannt. D.h. jeder Spieler wusste, wann das Spiel endet. Es ist aber auch möglich, dass das Ende des Spiels nicht absehbar ist. In diesem Fall ist eine Visualisierung des Spiels in Extensivform nicht möglich. Bei unendlichen Spielen ist es nicht realistisch, dass die Spieler die Entscheidungen der anderen Spieler in der Vergangenheit kennen. Es besteht also unvollkommene Information [RSS00].

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das Spiel in diskreten Runden stattfindet. D.h. jeder Spieler  $i$  kann in jeder Runde  $t$  eine Strategie  $s_i$  wählen. Abhängig von den Strategien aller anderen Spieler  $s_{-i}$ , ist die Auszahlung des Spielers pro Runde  $v_i(s)$  mit  $s = (s_i, s_{-i})$ . Für das gesamte Spiel berechnet sich die Auszahlung des Spielers dann als Summe der Auszahlungen pro Runde. Dabei wird die Auszahlung jede Runde mit dem Diskontierungsfaktor  $\beta$  abgezinst. Die Diskontierung drückt aus, dass ein Spieler  $i$  eine Auszahlung in der aktuellen Runde einer Auszahlung in der Zukunft vorzieht. Damit ergibt sich die erwartete Auszahlung [KiW89] für das gesamte Spiel als

$$E \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t v_i(s).$$

Da die Spieler die Strategien der anderen Spieler  $s_{-i}$  nicht beobachten können, wird auch bei unendlichen Spielen davon ausgegangen, dass die Spieler Überzeugungen bezüglich der Strategien der anderen Teilnehmer  $\mu_i$  aufbauen. Diese Überzeugungen unterscheiden sich von den Überzeugungen bei der Bestimmung sequentieller Gleichgewichte  $\rho_i$ : Sie beschreiben nicht die Wahrscheinlichkeit, die ein Spieler einem bestimmten Entscheidungsknoten zuordnet, sondern die Wahrscheinlichkeit, die ein Spieler den Strategien der anderen Spieler zuordnet.

## 2.2.6 Gleichgewichte in unendlichen Spielen

Ein Gleichgewichtskonzept für unendliche Spiele ist das so genannte stationäre Gleichgewicht. Dieses wird im Folgenden eingeführt.

**Stationäres Gleichgewicht:** In einem stationären Gleichgewicht folgen die Spieler über alle Folgerunden derselben Strategie. Ein stationäres Gleichgewicht ist analog zum sequentiellen Gleichgewicht erreicht, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind [KiW89]

1. *Optimalität:* Jeder Spieler  $i$  wählt die Strategie, die seine Auszahlung maximiert.
2. *Konsistenz:* Die Überzeugungen der Spieler stimmen mit der Realität überein.

Bedingung 1 (Optimalität) ist erfüllt, wenn alle Spieler die Auszahlung für das gesamte Spiel gegeben die Auszahlungen der anderen Spieler maximieren. Das Optimierungsziel ist demnach

$$\max E \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t v_i((s_i, s_{-i})).$$

Wird ein Spiel als unendlich lang betrachtet, so ist es aus Sicht der Spieler egal, in welcher Runde sie sich befinden. Die Auszahlung in der Zukunft ist unabhängig von der Runde immer gleich. Ausgehend von einer bestimmten Runde  $t$  ist die erwartete Auszahlung (vgl. [KiW89]) für das verbleibende Spiel

$$v_i^t = \max\{v_i((s_i, s_{-i}))\} + \beta v_i^{t+1} \text{ für alle } t \in \{1, \dots\}.$$

Da im stationären Gleichgewicht davon ausgegangen wird, dass die Spieler jeder Runde dieselbe Strategie wählen, ist es ausreichend den Ausdruck  $\max\{v_i((s_i, s_{-i}))\}$  zu optimieren, um Bedingung 1 zu erfüllen.

Bedingung 2 (Konsistenz) ist erfüllt, wenn die tatsächliche Verteilung der Strategien der Spieler mit den Überzeugungen  $\mu_i$  der Spieler übereinstimmen: Da die Spieler in einem unendlich langen Spiel unendlich viele Interaktionen mit den jeweils anderen Spielern besitzen und kein Spieler im Gleichgewicht die Strategie ändert, nähern sich die Überzeugungen im Gleichgewicht der tatsächlichen Verteilung an.

### 2.2.7 Mechanismusgestaltung

Die Spieltheorie bildet die Grundlage für Mechanismusgestaltung [FuT91]. Bei der Mechanismusgestaltung wird zwischen einem Prinzipal und dem Agenten unterschieden. Ziel der Mechanismusgestaltung ist es für die Agenten Anreize zu schaffen, so dass sich diese entsprechend der Vorstellungen des Prinzipals verhalten. Dies wird dann zum Problem, wenn zwischen den Teilnehmern Informationsasymmetrie [Ake70] besteht: Die Agenten verfügen über Informationen, die der Prinzipal nicht kennt, im Umkehrschluss besitzt der Prinzipal unvollständige Information. Zwar kann der Prinzipal die Agenten nach dieser Information befragen, diese werden aber Antworten geben, welche ihnen einen strategischen Vorteil bieten. Ein Ausweg sind Anreize: Der Prinzipal erreicht durch Anreize, dass es sich für den Agenten lohnt seine Informationen ehrlich preiszugeben. Da das Anbieten von Anreizen mit Kosten verbunden ist, hat der Prinzipal meist die Wahl zwischen unterschiedlichen Kombinationen aus Anreizen und erwarteten Strategien des Agenten. Der Prinzipal wählt dabei die Anreize so, dass der Agent einer für ihn optimalen Strategie folgt.

Der Prinzipal kann bei der Wahl der optimalen Handlungsalternative verschiedenen Zielen folgen [Var91]. Zum Einen kann die optimale Handlungsalternative ein Ergebnis des Spiels sein, das die Auszahlung des Prinzipals maximiert (beispielsweise bei der Wahl von Auktionsmechanismen). Zum Anderen kann die optimale Handlungsalternative eine Alternative sein, welche die Wohlfahrt maximiert (beispielsweise wenn der Prinzipal der Staat ist). In diesem Zusammenhang ist auch der Begriff der *Effizienz* von Bedeutung: Ein System ist effizient, wenn die Auszahlung im System maximal ist.

Während der Prinzipal in der Regel nur eine Person ist, entweder ein Dienstleister oder auch die Regierung bzw. der Systemdesigner, können durchaus mehrere Agenten bei der Mechanismusgestaltung berücksichtigt werden. Mechanismusgestaltung wird üblicherweise mit einem dreistufigen Spiel mit unvollständiger Information modelliert [FuT91]. Im ersten Schritt modelliert der Prinzipal einen Anreizmechanismus. Im zweiten Schritt entscheiden alle Agenten gleichzeitig, ob sie am Spiel teilnehmen und im dritten Schritt wird das Spiel zwischen den verbleibenden Agenten gespielt.

### 2.3 Anreizproblem in Computersystemen

Beim Entwurf von Computersystemen treten zwei unterschiedliche Ziele auf: (1) Der Einzelne hat das Ziel, seinen Nutzen zu maximieren. (2) Ziel der Gemeinschaft ist es, die Wohlfahrt zu maximieren. D.h. das Bestreben des einzelnen Teilnehmers bei möglichst geringen Kosten möglichst stark vom System zu profitieren, steht dem Ziel ein aus ökonomischer Sicht effizientes System zu etablieren gegenüber (engl. tragedy of the commons [Har68]). Ziel des System-

designers von Computersystemen ist es, die Teilnehmer durch geschickte Wahl von Anreizmechanismen zum Erreichen der Effizienz des Systems zu bewegen. Der Systemdesigner tritt demnach als Prinzipal und die Teilnehmer als Agenten eines Problems zur Mechanismusgestaltung auf.

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert ist bei der spieltheoretischen, also formalen Betrachtung der erste Schritt nach der Bestimmung der Akteure die Identifikation der strategischen Möglichkeiten, also der Aktionen, zwischen denen ein Spieler wählen kann. Diese Aktionen beeinflussen den Nutzen, den ein Spieler aus der Teilnahme am System zieht.

Diese Arbeit konzentriert sich ausschließlich auf die Aktionen, die bei der Bearbeitung von Anfragen auftreten. Alle anderen Aktionen, wie der Aufbau von Verbindungen zwischen verschiedenen Teilnehmern oder das Einfügen von Inhalten, wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Folgende bei der Bearbeitung von Anfragen auftretende Aktionen werden in dieser Arbeit betrachtet: (1) Die Bereitstellung von Daten, (2) das Anfragen von Daten, (3) die Indexierung der im System vorhandenen Daten und (4) das Weiterleiten von Anfragen. Mit jeder Aktion zur Bearbeitung von Anfragen sind Kosten verbunden. Diese stehen Erlösen gegenüber, welche die Teilnehmer aus dem Bezug von Daten beziehen.

Unabhängig von der gewählten Systemarchitektur lassen sich keine Erlöse aus einem System ziehen, ohne die Kosten für die Anfrage selbst zu tragen. D.h. ohne nach Informationen zu suchen, lässt sich nicht von den im System vorhandenen Daten profitieren. Die übrigen Kosten werden aber nicht vom Anfragenden selbst, sondern von einem anderen Systemteilnehmer entlang der Route getragen. Im Folgenden wird abhängig von der gewählten Systemarchitektur darauf eingegangen, wer die Kosten trägt und damit über die Erbringung der einzelnen Aktionen entscheiden kann. Auf Basis dieser Überlegungen wird beschrieben, ob bzw. für welche Systemteilnehmer ein Anreizproblem entsteht.

### **2.3.1 Client-Server Systeme**

In Client-Server Systemen entscheidet der Dienstgeber über die Bereitstellung und Indexierung der Inhalte. Anfragen müssen hier nicht weitergeleitet werden: Der Dienstgeber verwaltet alle Informationen. Weder er noch andere Teilnehmer müssen Anfragen weiterleiten. Jeder Klient kann Entscheiden, ob er Inhalte anfragt oder nicht. Der Dienstgeber trägt somit den Großteil der auftretenden Kosten. Er stellt Daten zur Verfügung und indexiert diese. Die Nutznießer der bereitgestellten Informationen sind hier die Klienten.

Zwar besteht in Client-Server Systemen Informationsasymmetrie – der Klient weiß nicht, ob der Dienstgeber alle Anfragen bearbeitet – jedoch ist dies im Normalfall nicht problematisch: Die Kosten für das Stellen einer Anfrage sind, verglichen mit dem erwarteten Erlös, für den Erhalt eines Anfrageergebnisses gering. D.h. der Klient kann ohne große Verluste auf einen anderen Anbieter wechseln, wenn seine Anfragen nicht beantwortet werden. Kosten für das Bearbeiten von Anfragen fallen für ihn nicht an. Werden Anfragen nicht beantwortet, kann hier davon ausgegangen werden, dass der Dienstgeber dies beabsichtigt.<sup>1</sup>

Der Dienstgeber in Client-Server Systemen hat im Normalfall einen Anreiz Daten bereitzustellen. Dabei sind die folgenden Anreize üblich:

---

<sup>1</sup> Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Übertragung von Nachrichten nicht fehlerbehaftet ist. D.h. eine Anfrage die abgeschickt wurde erreicht ihr Ziel. Zurückgeschickte Antworten gehen nicht verloren.

- *Werbung*: 2006 wurden weltweit \$16,9 Mrd. in diese Art von Werbung investiert [PWC07]. Dadurch werden heute unter Anderen Suchmaschinen, E-Mail Anbieter und Nachrichtenportale finanziert.
- *Bezahlung*: Besonders bei Onlinespielen, E-Mail Anbietern und sozialen Netzwerken müssen Klienten für der zur Verfügung gestellten Daten bezahlen.

Betreiber von Dienstgebern können also ihre Kosten decken, indem sie die Klienten für bereitgestellte Daten bezahlen lassen, oder indem sie ihre Inhalte über Werbung finanzieren. Die Dienstgeber haben somit keinen Anreiz das Anbieten von Daten zu unterlassen. Sowohl Werbung als auch Bezahlung hängen meist direkt vom Angebot ab. Beides ist durch den Bezahlenden, Werber oder Klienten, direkt beobachtbar.

*Beispiel*: Ein Dienstgeber stellt den Klienten Nachrichten bereit. Dabei trägt er die Kosten für das Bereitstellen und für die Indexierung der Nachrichten. Klienten können nun auf diese Daten zugreifen. Um die Kosten des Dienstgebers zu kompensieren, kann dieser nun Werbung zwischen die Nachrichten schalten. Dafür wird er von einem Dritten abhängig von der Anzahl der Klienten, welche die Nachrichten und damit die Werbung abrufen bezahlt. Der Dienstgeber hat somit einen Anreiz möglichst viele Informationen möglichst vielen Klienten zur Verfügung zu stellen. Finanziert sich der Dienstgeber durch Bezahlung der Klienten, so wird er von den Klienten für das Bereitstellen von Nachrichten entlohnt. Er hat auch in diesem Fall einen Anreiz zuverlässig die Nachrichten anzubieten. Tut er dies nicht, so wechseln die Klienten auf andere Anbieter und seine Auszahlung verringert sich. ■

### 2.3.2 Peer-to-Peer Systeme

Peer-to-Peer Systeme unterscheiden sich in dieser Beziehung stark von Client-Server Systemen. Hier entscheiden die Teilnehmer, also die Peers, über die Bereitstellung von Daten. Es ist unwahrscheinlich, dass ein Peer demselben anderen Peer wiederholt Daten anbietet [FLS04]. Somit kann jeder Peer die Kosten für die Teilnahme am System reduzieren, indem er sich nicht an der Bereitstellung von Daten beteiligt. In einem solchen System mit ausschließlich auszahlungsmaximierenden Teilnehmern werden keine Anfragen beantwortet: Das System kann als zweistufiges dynamisches Spiel betrachtet werden (siehe Abb. 12). In dem Spiel entscheidet zunächst Spieler  $i$ , der Klient, ob er eine Anfrage stellt. Abhängig davon entscheidet Spieler  $j$ , der Dienstgeber, ob er die Anfrage bearbeitet. Entscheidet sich Spieler  $j$  für das Beantworten der Anfrage, so entstehen im Kosten für das Antworten  $v_j(A)$  mit  $v_j(A) < 0$ . Verschickt er keine Antwort, entstehen ihm keine Kosten. Spieler  $i$  entstehen Kosten, wenn er eine Anfrage abschickt ( $v_i(S)$  mit  $v_i(S) < 0$ ). Wird seine Anfrage beantwortet, so erhält er den Erlös  $v_i(R)$  (mit  $v_i(R) > 0$ ).

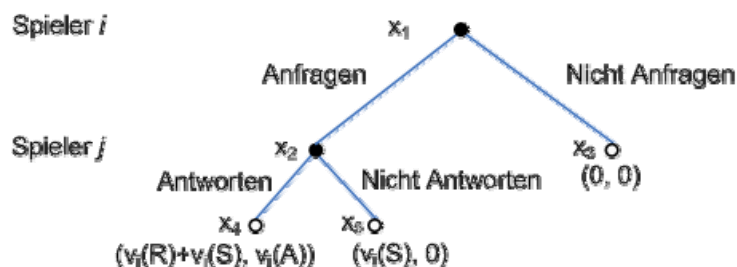


Abb. 12: Peer-to-Peer System mit einmaliger Interaktion



Das entsprechende Spiel (siehe Abb. 12) lässt sich mittels Rückwärtsinduktion lösen. Für Spieler  $j$  dominiert die Aktion „Nicht Antworten“ die Aktion „Antworten“, da  $v_j(A) < 0$  gilt. Spieler  $j$  wird folglich die eingehende Anfrage nicht beantworten. Spieler  $j$  kann dieses Verhalten antizipieren und keine Anfragen absetzen. Um Dienstgeber dennoch zu motivieren Anfragen zu beantworten, können Anreizsysteme [Var01] genutzt werden: Hierbei wird das Verhalten der Teilnehmer beobachtet. Zeigen diese das gewünschte Verhalten, so werden sie belohnt. In Peer-to-Peer Systemen können beispielsweise Anfragen für Klienten nur dann beantwortet werden, wenn diese als Dienstgeber Anfragen beantwortet haben.

Durch den Einsatz von Anreizsystemen tritt jedoch eine weitere Schwierigkeit auf: Das Verhalten anderer Peers lässt sich nicht direkt beobachten: Es besteht unvollkommene Information. D.h. während in einem Client-Server System derselbe Klient wiederholt direkt mit demselben Dienstgeber interagiert und dessen Leistungsfähigkeit gut abschätzen kann, stellt ein Dienstgeber in einem Peer-to-Peer System meist nur einmal das Ergebnis einer Dienstanfrage demselben Klienten bereit. Damit besteht Informationsasymmetrie zwischen dem Dienstgeber und dem Klienten. Der Dienstgeber weiß nicht, ob der Klient in der Vergangenheit kooperativ war und ob er für ihn Anfragen bearbeiten sollte oder nicht. Der Klient kann nun versuchen Freifahrerverhalten zu zeigen.

*Freifahrer* sind Knoten, die Anfragen stellen und hoffen diese Dank der Informationsasymmetrie beantwortet zu bekommen, ohne selbst Anfragen für andere Knoten zu bearbeiten.

In der ökonomischen Literatur werden zur Lösung der Informationsasymmetrie verschiedene Mechanismen vorgestellt [Ake70]:

- *Lizenzierung*: Marktteilnehmer erhalten eine Lizenz für vorher erbrachte Leistungen. So garantieren beispielsweise Meisterbrief im Handwerk, dass der betreffende Handwerker eine Ausbildung durchlief, die ihn befähigt seine Aufgabe zu lösen.
- *Garantien*: Marktteilnehmer garantieren vor Durchführung eines Auftrages, dass und in welchem Maße sie die angeforderte Leistung erbringen. Wird die Leistung nicht erbracht ermöglicht die Garantie das Rückgängigmachen der Transaktion.
- *Markennamen*: Marktteilnehmer können sich durch Markennamen von anderen Anbietern abheben. Durch den Markennamen ist der einzelne Anbieter direkt identifizierbar, er baut über die Zeit eine Reputation bei den Nachfragern auf. Die Reputation ist dann ein Indiz für die Zuverlässigkeit des Anbieters.

Existierende Mechanismen in Peer-to-Peer Systemen basieren meist auf einem dieser drei Ansätze. Während Markennamen dem Peer-to-Peer Gedanken entsprechen (Informationen zur Reputation eines Marktteilnehmers lassen sich leicht ohne zentrale Instanz zwischen den Teilnehmern austauschen), erlauben Lizenzen und Garantien dies nicht. Hier muss entweder eine zentrale Instanz Lizenzen an die Teilnehmer vergeben, oder sicherstellen, dass die Garantien auch eingehalten werden. Diese Beobachtung zeigt, dass es bei der Wahl von Anreizmechanismen essentiell ist, ob im Peer-to-Peer System eine zentrale Instanz zur Verfügung steht, oder nicht. Daher wird bei der Vorstellung von Anreizmechanismen im Folgenden zwischen Systemen mit zentraler Instanz und Systemen ohne solche Instanz unterschieden.

**Systeme mit zentraler Instanz:** In zentralisierten Peer-to-Peer Systemen lässt sich auf Lizenzierung und Garantien zurückgreifen: Lizenzierung kann hier über zertifizierten Code erfolgen [Cha02]. Die zentrale Instanz kann dann bei jedem Knoten überprüfen, ob er unverändert ist

und sich so verhält, wie es von der zentralen Instanz beabsichtigt ist. Knoten, welche dem Protokoll des Systemdesigners nicht folgen, können nicht am System partizipieren. So kann unkooperatives Verhalten unterbunden werden. Hier entscheidet nicht mehr der einzelne Betreiber des Knotens, ob er Anfragen beantwortet oder nicht, sondern die vom Systembetreiber gewählte Strategie wird befolgt.

Ähnlich kann die zentrale Instanz Garantien für im System erbrachte und konsumierte Leistungen geben. Dabei überwacht die zentrale Instanz, wie viele Daten ein Knoten bezogen hat und wie viele Daten er bereitgestellt hat. Abhängig von der Menge der konsumierten Daten kann entweder das Bereitstellen der Daten in Rechnung gestellt werden oder eine Gegenleistung in Form von Informationsbereitstellung eingefordert werden. Abhängig von der Art der Gegenleistung wird zwischen Tauschwirtschaften (engl. *Bantering-System*) und Bezahlssystemen (engl. *Payment-System*) unterschieden.

- Wird im Rahmen des Systems eine Tauschwirtschaft etabliert [VCS03], so muss jeder, der Daten beziehen will, auch eigene Daten bereitstellen. In einer Tauschwirtschaft werden einem Knoten nur Anfragen beantwortet, wenn er zuvor selbst in gleichem Maße Anfragen beantwortet hat.
- Bezahlssysteme basieren auf virtuellen Währungen (engl. Micropayments) [GLM01]. D.h. jeder Knoten zahlt für die genutzte Leistung und wird für konsumierte Leistung entlohnt. Verglichen mit den Kosten für die Informationsbereitstellung sind die Transaktionskosten dabei meist hoch. Neuere Ansätze, wie PPay [YaG03] versuchen daher, die Infrastrukturkosten durch den Austausch der virtuellen Währung zu reduzieren. Im Gegensatz zu Tauschwirtschaften wird bei Bezahlssystemen eine virtuelle Währung und nicht das eigentliche Gut ausgetauscht.

Die Durchsetzung von Garantien ist dabei aber schwierig: Anders als bei Client-Server Systemen beobachtet hier nicht die zentrale Instanz selbst die anderen Teilnehmer. Hier ist es Aufgabe der Knoten das Ergebnis einer abgeschlossenen Interaktion an die zentrale Stelle zu melden. Die Knoten besitzen einen Anreiz falsche Angaben zu machen. Der Dienstgeber, der die Leistung erbrachte, hat den Anreiz mehr als die bereitgestellte Leistung der zentralen Instanz zu kommunizieren. Der Klient, der die Daten bezog, kann seine Situation verbessern, indem er den Informationserhalt leugnet. Ist strittig, wer wie viel zum System beitrug, kann die Leistung nicht berechnet werden. Dieses Problem lässt sich aber lösen, indem falsche Angaben von der zentralen Instanz bestraft werden [JuF04]: Dafür müssen Klient und Dienstgeber vor einer Interaktion einen bestimmten Betrag an die zentrale Instanz zahlen. Nach der Interaktion müssen beide diese beurteilen. Ist ihr Urteil gleich, so bekommen sie den eingezahlten Betrag zurück, sonst wird er von der zentralen Instanz einbehalten. Das Anreizproblem in Systemen mit zentraler Instanz ist damit gelöst.

**Systeme ohne zentrale Instanz:** Bisher wurde diskutiert, wie dem Anreizproblem in Client-Server Systemen und in Peer-to-Peer Systemen mit zentraler Instanz begegnet werden kann. In Systemen ohne zentrale Instanz ist die Lösung des Problems weitaus schwieriger. Hier kann die Informationsasymmetrie zwischen Klienten und Dienstgebern nur über Markennamen, d.h. Reputation, eingeschränkt werden.

Zudem sind hier in die einzelnen Interaktionen nicht mehr nur zwei Knoten, einer für die Bereitstellung der Daten und einer für das Abrufen der Daten, involviert. Vielmehr müssen einige andere Knoten die Anfragen weiterleiten: Während der Dienstgeber sein Leistungsniveau selbst

wählt und damit selbst einschätzen kann, ist dies für den Klienten nicht mehr direkt beobachtbar. Anfragen werden meist nicht direkt von dem Knoten abgearbeitet, der die Anfrage vom Klienten erhält, sondern in dessen Auftrag an den nächsten potentiellen Dienstgeber weitergeleitet. Der Klient weiß auch nach Abschluss der Interaktion nicht, ob sein Gegenüber die von ihm gesuchten Daten besitzt. Er kann nur beobachten ob seine Anfrage beantwortet wird oder nicht.

In unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen weiß der Klient nur, ob seine Anfrage beantwortet wurde. In strukturierten Peer-to-Peer Systemen kennt er daneben noch den Knoten, der die Anfrage als erster erhielt. Der Klient kann damit das Leistungsniveau des Dienstgebers nicht direkt beobachten. Er muss die Leistung des Dienstgebers abschätzen. In Abschnitt 2.4 wird erläutert, wie die einzelnen Knoten die Leistung anderer abschätzen können.

### 2.3.3 Zusammenfassung und Bewertung

Die Motivation der Teilnehmer sich an der Bereitstellung von Daten zu beteiligen, hängt von der gewählten Systemarchitektur ab. Besonders in Client-Server Systemen und zentralisierten Peer-to-Peer Systemen lassen sich wie beschrieben Anreize für die aktive Teilnahme am System etablieren. In beiden Systemen kann die zentrale Instanz genutzt werden, um das Datenaufkommen im System zu überwachen und kooperatives Verhalten zu erzwingen. Hierfür können Garantien und Lizenzierung genutzt werden. Das Anreizproblem für Systeme mit zentraler Instanz ist somit gelöst. Diese Architekturen sollen daher im Weiteren nicht betrachtet werden. Bei reinen, hybriden und strukturierten Peer-to-Peer Systemen sind Garantien und Lizenzen allerdings nicht anwendbar. Tab. 5 fasst die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte zusammen.

<b>Eigenschaft</b>	<i>Client-Server</i>	<i>P2P (zentralisiert)</i>	<i>P2P (unstrukturiert)</i>		<i>P2P (strukturiert)</i>
			<i>P2P (rein)</i>	<i>P2P (hybrid)</i>	
<i>Gleichverteilung der Kosten</i>	nein	nein	ja	nein	ja
<i>Anreizproblem</i>	gelöst	gelöst	offen	offen	offen

**Tab. 5: Vergleich unterschiedlicher Systemarchitekturen**

In Systemen ohne zentrale Instanz können Reputationssysteme genutzt werden, um das Anreizproblem zu lösen. Das Kernproblem von Reputationssystemen besteht darin, das Verhalten anderer Teilnehmer mit möglichst wenig zusätzlichem Aufwand möglichst zuverlässig zu beobachten. In Abschnitt 2.4 werden unterschiedliche Reputationssysteme vorgestellt. Dabei werden reine und hybride Peer-to-Peer Systeme zu unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen zusammengefasst, um sie von strukturierten Peer-to-Peer Systemen abzugrenzen.

## 2.4 Reputationssysteme in Systemen ohne zentrale Instanz

*Reputationssysteme* [AbH00, KSG03b, XiL04] verfolgen das Ziel, die Menge der Knoten in vertrauenswürdige und nicht vertrauenswürdige zu unterteilen [Mar94] und so Freifahrerverhalten zu unterbinden. Dabei ist *Vertrauen* definiert als subjektive Einschätzung eines Knotens bezüglich der Zuverlässigkeit eines anderen Knotens [RZF00]. Hierfür wird das Verhalten der Knoten durch andere Knoten beobachtet und bewertet. In der Literatur werden hierfür unterschiedliche Informationsquellen, insbesondere eigene Beobachtungen und Feedback, vorgeschlagen. Auf der Basis dieser Informationen kann ein Knoten das Verhalten seiner Interaktionspartner in der

Zukunft ableiten [RZF00]. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über verschiedene Informationsquellen und stellt dann Algorithmen aus der Literatur vor mit deren Hilfe Vertrauensentscheidungen getroffen werden können.

### 2.4.1 Informationsquellen

**Eigene Beobachtungen:** Eigene Beobachtungen sind die erste Informationsquelle, auf die Dienstgeber bei der Beurteilung von Klienten zurückgreifen können. Solche Beobachtungen können nicht strategisch genutzt werden, d.h. ein Dienstgeber, der das Verhalten eines Klienten in der Vergangenheit beobachtet hat, kann das Verhalten des Klienten einschätzen ohne auf Informationen Dritter zurückgreifen zu müssen (siehe z.B. [FLS04]). Während Beobachtungen meist die Grundlage für andere Mechanismen, wie Feedback oder Struktur bieten, sind Beobachtungen isoliert betrachtet nicht geeignet, Vertrauen zwischen Knoten aufzubauen: In Peer-to-Peer Systemen profitieren die Knoten meist von Interaktionspartnern, mit denen sie nicht wiederholt Daten austauschen. Im Fall von strukturierten Peer-to-Peer Systemen kann ein Teilnehmer zwar das Verhalten seiner Kontakte beobachten, nicht aber das Verhalten aller Knoten, die einen Nutzen aus seinen Weiterleitungen ziehen. Damit sind die eigenen Beobachtungen alleine, insbesondere in Peer-to-Peer Systemen mit mehreren tausend Knoten, nicht hilfreich.

**Feedback:** Werden eigene Beobachtungen mit anderen Knoten geteilt, so spricht man von Feedback. Hierfür werden Erfahrungen aus der Vergangenheit mit anderen Knoten über Nachrichten ausgetauscht. Beim Austausch von Feedback sind unterschiedliche Varianten denkbar. So schlagen Aberer und Despotovic [AbD01] vor, ausschließlich negatives Feedback, also Beschwerden, untereinander auszutauschen. Alternativ kann auch positives Feedback zugelassen werden (siehe z.B. [BBW06]). In diesem Fall kann nicht nur unerwünschtes Verhalten bestraft, sondern auch erwünschtes Verhalten belohnt werden. Verglichen mit eigenen Beobachtungen bietet Feedback einige Nachteile: Zum Einen kann Feedback strategisch genutzt werden. Zum Anderen werden zum Austausch von Feedback zusätzliche Nachrichten notwendig [JuF04] oder Feedback kann nur an Nachrichten angehängt werden, die ohnehin verschickt werden [BBW06].

**Struktur:** Ein weiterer Aspekt, der für die Einschätzung der Verhaltens eines anderen Knotens herangezogen werden kann, ist die Struktur des Systems selbst (siehe z.B. [BBW06]). Im Gegensatz zu Feedback, ist dies allerdings nur bei strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit bilateralen Verbindungen möglich. In dieser Art von Systemen tritt direkte Interaktion primär zwischen denselben Knoten auf. D.h. zwei Knoten, die über eine bilaterale Verbindung kommunizieren, können das Verhalten des jeweils anderen abschätzen, während sie mit den anderen Knoten im System nicht direkt interagieren. Diese Beobachtungen können dann genutzt werden, um über die Bearbeitung eingehender Anfragen zu entscheiden.

### 2.4.2 Ableitung von Vertrauensentscheidungen

*Vertrauen* ist binär, d.h. ein Knoten vertraut einem anderen Knoten oder nicht. Um ausgehend von verschiedenen Informationen über einen Knoten eine Vertrauensentscheidung treffen zu können, müssen diese Informationen aggregiert werden. Das Ergebnis solcher Aggregationen wird im Folgenden als *Reputationswert* des Knotens bezeichnet. Der Reputationswert ist eine beliebige Zahl in einem durch die Aggregation festgelegten Intervall. Einem Knoten wird dann vertraut, wenn die Reputation in einem vorher bestimmten Ausschnitt des Intervalls liegt.

In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen, wie Reputationswerte auf der Basis von Beobachtungen, Feedback und Struktur mathematisch bestimmt werden. Ziel dabei ist es stets, die Nachteile eines der drei Ansätze mit Hilfe der anderen Ansätze zu verringern. D.h. während die Menge eigener Beobachtungen bezüglich aller Knoten sehr überschaubar ist, ermöglicht die Kombination mit Feedback die Nutzung von wesentlich mehr Informationen. Ähnlich kann der strategischen Nutzung von Feedback entgegengetreten werden, in dem eingegangenes Feedback mit Hilfe der Netzstruktur gewichtet wird. Im Folgenden sollen entsprechende Kombinationsmethoden vorgestellt werden. Die entsprechende Vorstellung folgt der Strukturierung von Josang et al. [JIB06], berücksichtigt als Quellen aber primär Arbeiten mit dem Anwendungsgebiet Peer-to-Peer Systeme und geht ausschließlich auf Ansätze ein, die in Peer-to-Peer Systemen Anwendung finden.

**Einfache Aggregate:** Die einfachste Art Feedback zu aggregieren ist das Aufsummieren der positiven Beobachtungen (eigene und Feedback) sowie der negativen Beobachtungen. Wird aus beiden Summen die Differenz gebildet, so erhält man einen sehr einfachen Vertrauenswert. Dieses sehr einfache Verfahren findet beispielsweise bei eBay Anwendung [ReZ02]. Dieser Ansatz bietet aber Nachteile, so zeigen Beobachtungen von eBay, dass wesentlich mehr positives als negatives Feedback vergeben wird. Das Ergebnis ist damit nicht sehr informativ [ReZ02]. Während dieses Verfahren dank seiner Verständlichkeit in Systemen eingesetzt wird, in welchen Menschen Vertrauensentscheidungen auf Basis des Reputationswertes bilden, ist es in Peer-to-Peer Systemen unbrauchbar.

Eine andere Alternative der Berechnung ist das Bilden von Quotienten aus positiven und negativen Beobachtungen. Dieser Quotient ist somit eine Art Durchschnitt über die Beobachtungen eines Knotens. Feldman et al. [FLS04] nutzen diesen Ansatz in Peer-to-Peer Systemen.

Eine letzte Variante ist die Berechnung von Aggregaten unter Gewichtung der Beobachtungen. Dabei sind unterschiedliche Alternativen denkbar. Zum Einen kann Feedback mit der Vertrauenswürdigkeit des Absenders [SXL05] oder abhängig vom Alter gewichtet werden [AzM02]. Zum Anderen ist die Gewichtung abhängig von den eigenen Beobachtungen möglich [BBW06].

**Bayes-Schätzung:** Sind eigene Beobachtungen und Feedback, wie in Peer-to-Peer Systemen stets binär (also entweder positiv oder negativ), so kann der Reputationswert statistisch ermittelt werden. Die zu Grunde liegende Annahme dabei ist, dass jeder Knoten mit einer festen, aber den Teilnehmern unbekanntem Wahrscheinlichkeit kooperiert. Der Knoten, der diese unbekanntem Wahrscheinlichkeit vorhersagen will, tut dies, in dem er die Wahrscheinlichkeit aus einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, der Prior-Verteilung, zieht. Diese Prior-Verteilung wird auf Basis der eigenen Beobachtungen und des Feedbacks gebildet und bei jeder neuen Information aktualisiert.

Als Prior-Verteilung wird hierfür meist die Beta-Verteilung angenommen. Der Beta-Verteilung können zwei Parameter übergeben werden. Initial sind beide dieser Werte 1, und die Beta-Verteilung beschreibt eine Gleichverteilung über den Wertebereich zwischen 0 und 1. Bei der Interpretation als Prior-Verteilung entspricht der erste Parameter der Summe aller positiven Feedbacks und der zweite der Summe aller negativen. Bei jeder neuen Beobachtung wird die Beta-Verteilung aktualisiert. Nach mehreren Beobachtungen nähert sich die Beta-Verteilung dann einer Verteilung nahe 0 mit einem Peak an der Stelle des Erwartungswerts der Beta-Verteilung. Dieser Erwartungswert kann als vorherzusagende Kooperationswahrscheinlichkeit interpretiert werden [JoI02].

Die Bestimmung des Reputationswertes mit dieser Art von Bayes-Schätzung besitzt den Vorteil, dass die Berechnung theoretisch fundiert ist. Allerdings hat sie den Nachteil, dass sie für den Laien schwer interpretierbar ist [JIB06]. Der Einsatz dieses Verfahrens in Peer-to-Peer Systemen wurde von Buchegger und Boudec vorgeschlagen [BuB04a].

**Modell von Überzeugungen:** Die Idee hinter dem Modell von Überzeugungen, einer weiteren Art Beobachtungen zu aggregieren, ist, das Vertrauen als Graph zu visualisieren. Dabei entspricht jeder Knoten des Netzes einem Knoten innerhalb dieses Graphen, während jede (gerichtete) Kante einer direkten Vertrauensbeziehung entspricht, d.h. beide Knoten einer Kante haben mindestens einmal miteinander interagiert. Der Knoten, der Vertrauen erbringt, ist der Ausgangspunkt einer Kante, während der Knoten, dessen Vertrauenswürdigkeit zu untersuchen ist, den Zielpunkt der Kante bildet.

Anschließend werden alle Pfade zwischen zwei Knoten bestimmt. Für jeden Pfad kann dann ein Wert bestimmt werden, welcher das Vertrauen des Ausgangsknotens in den Zielknoten widerspiegelt. Diese Werte werden schließlich zu einem Vertrauenswert des Ausgangsknotens in den Zielknoten aggregiert. Dabei existieren verschiedene Alternativen für die Aggregation. Zum Einen, kann das Vertrauen der Knoten untereinander als Abzinsfaktor genutzt werden [JIB06]. D.h. Vertrauen zwischen zwei direkt miteinander verbundenen Knoten wird mit einem Wert zwischen 0 und 1 gewichtet. Dabei bedeutet 0 die Knoten vertrauen sich nicht und 1 die Knoten vertrauen sich sehr. Der Vertrauenswert über einen Pfad wird dann bestimmt, indem diese Vertrauensgewichte zwischen Ausgangsknoten und Zielknoten multipliziert werden. Zum Anderen, kann für jeden Vertrauenspfad bestimmt werden, ob eine Kante zwischen zwei Knoten impliziert, dass sich die verbundenen Knoten nicht vertrauen. Ist dies der Fall, wird für den gesamten Pfad davon ausgegangen, dass sich auch Ausgangsknoten und Zielknoten nicht vertrauen [YuS00].

**Flussmodelle:** Während die vorangegangenen Graphenmodelle keine Zyklen zulassen und lange Pfade in der Regel benachteiligen, sind Flussmodelle eine weitere Art der Reputationsbetrachtung auf Graphen. Diese Modelle gehen davon aus, dass innerhalb des gesamten, durch einen Vertrauensgraph abgebildeten Netzwerkes, ein konstantes Vertrauensgewicht existiert. Dieses Vertrauensgewicht kann jeder Einzelne auf die Knoten der Gemeinschaft verteilen. Dabei führt jede Erhöhung des Reputationswertes eines Knotens zur Verringerung des Reputationswertes eines anderen. Dies wird realisiert, indem das Vertrauen eines Knotens über das Gewicht eingehender Kanten erhöht wird, während es über ausgehende Kanten verringert wird. Ein typisches Beispiel eines Flussmodells zur Bestimmung von Reputationswerten ist Page-Rank [PBM98]. Eine entsprechende Umsetzung für Peer-to-Peer Systeme ist Eigentrust [GSK03].

**Vergleich:** Die vorgestellten Methoden erlauben alle die Bestimmung von Reputationswerten auf der Basis von eigenen oder fremden Beobachtungen. Ein Teil (gewichtete Aggregate und graphenbasierte Ansätze) unterstützt zudem die Sicherstellung von ehrlichem Feedback. D.h. es wird versucht, die Möglichkeit der strategischen Nutzung von Feedback auszuschließen. Dies geschieht primär durch Gewichtung des Feedbacks abhängig von den Feedbackgebern.

### 2.4.3 Zusammenfassung und Bewertung

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Reputation von Knoten in Peer-to-Peer Systemen. Direkte Beobachtungen des Verhaltens anderer Knoten haben den Vorteil, dass diese Informationen nicht strategisch verfälscht werden können. In Peer-to-Peer Systemen

mit mehreren tausend Knoten ist es jedoch unwahrscheinlich, dass Knoten mit Anderen wiederholt interagieren. Hier hilft Feedback, um Vertrauen zwischen den einzelnen Knoten aufzubauen. Feedback hat jedoch den Nachteil, dass es strategisch genutzt werden kann. Um dem zu begegnen kann eingehendes Feedback abhängig vom Absender gewichtet werden. D.h. Feedback von vertrauenswürdigen Knoten wird stark gewichtet, während Feedback von nicht vertrauenswürdigen Knoten ignoriert wird.

## 2.5 Analyse von Reputationssystemen

Während eine große Menge an unterschiedlichen Informationsquellen und Berechnungsvorschriften zur Bestimmung von Reputationswerten existiert, ist die Evaluation dieser Ansätze schwierig. Für die Evaluation von komplexen Systemen werden in der Literatur unterschiedliche Methoden vorgeschlagen. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über solche Methoden. Den Einstieg bilden hierfür Simulationen: Wissenschaftliches Vorgehen bei der Durchführung von Simulationen beinhaltet und motiviert die anderen hier vorgestellten Methoden (Spieltheorie, empirische Untersuchungen und Verhaltensökonomie). Bei der Einführung der Methoden liegt der Fokus auf dem Vorgehen bei der Durchführung. Am Ende dieses Abschnitts werden die Vor- bzw. Nachteile der unterschiedlichen Ansätze diskutiert.

### 2.5.1 Simulationen

Simulationen, d.h. die numerische Untersuchung eines Problems, sind in der Informatik ein akzeptiertes und häufig angewandtes Vorgehen zur Evaluierung verschiedener Fragestellungen. Seriöse Simulationen umfassen nicht nur die Implementierung und Evaluierung einer Fragestellung, sondern stellen auch hohe Ansprüche an die Vor- und Nachbereitung der numerischen Untersuchung. Daher empfiehlt sich für die Durchführung von Simulationen eine feste Vorgehensweise [BCN99] (siehe Abb. 13). Im Folgenden wird dieses Vorgehen erläutert.

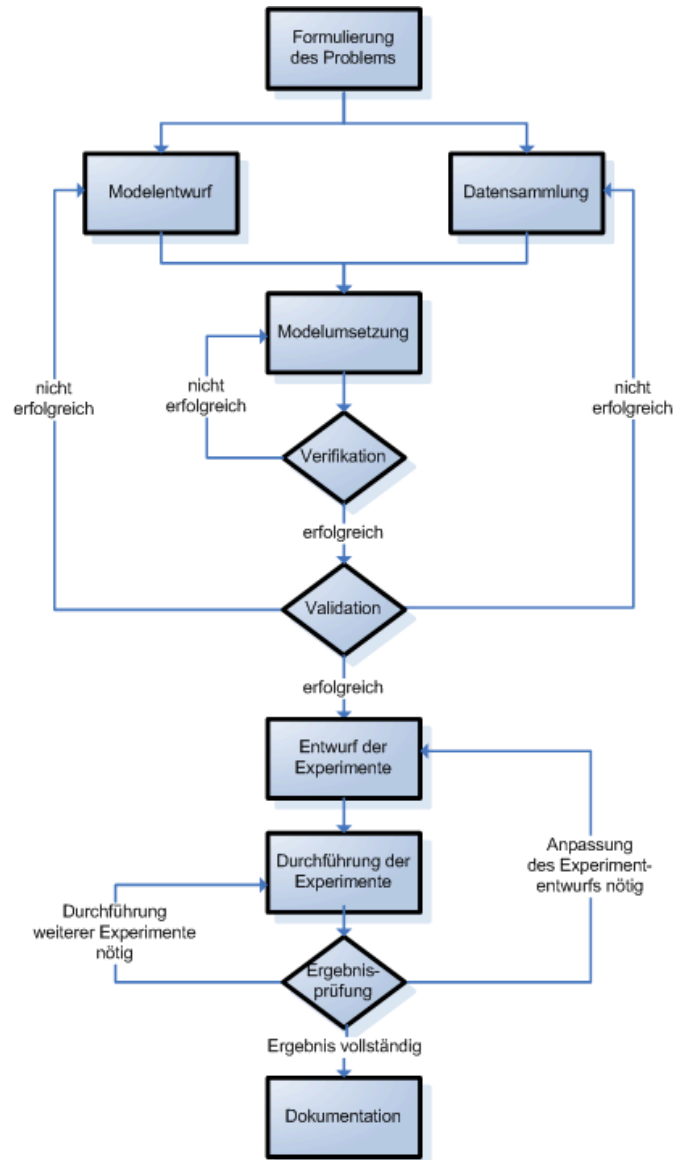
**Formulierung des Problems:** Zunächst sollten das zu untersuchende Problem eingegrenzt und die zu untersuchenden Fragestellungen definiert werden. In diesem Schritt muss auch geklärt werden, ob Simulationen geeignet sind die Fragestellungen zu beantworten.

**Modellentwurf:** Anschließend muss ein Systemmodell erstellt werden. Dieser Schritt ist einer der kritischsten Schritte für die Simulation. Ziel ist es, ein geeignetes Modell für die zu untersuchende Fragestellung zu entwerfen. Hierfür gibt es kein allgemeingültiges Vorgehensmodell, es haben sich aber einige Verhaltensregeln bewährt [Mor67]. So müssen zunächst die essentiellen Eigenschaften des Systems identifiziert werden. Es sollten weiterhin Annahmen getroffen werden, die das System charakterisieren. Schließlich sollten die identifizierten Eigenschaften und Annahmen so lange erweitert werden, bis das Modell aussagekräftige Vorhersagen verspricht. Ausgehend von einem einfachen Modell sollte folglich ein komplexeres Modell entwickelt werden, das alle Eigenschaften des Systems umfasst, welche die zu untersuchende Fragestellung beeinflussen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass das erstellte Modell nicht komplexer ist als nötig: Dies führt lediglich zu zusätzlichem Aufwand bei der Modellumsetzung.

**Datensammlung:** Parallel zum Modellentwurf sollten Eingangsdaten gesammelt werden, auf welchen die späteren Simulationen aufbauen. Dabei ist zu beachten, dass mit steigender Komplexität des Modells auch die Menge der zu sammelnden Daten steigt.

**Modellumsetzung:** Anschließend muss das entwickelte Modell in ein Programm umgesetzt werden.

**Verifikation:** Das umgesetzte Modell muss schließlich verifiziert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sowohl die Eingabeparameter als auch die logische Struktur des Modells korrekt im Computer umgesetzt wurden. Ist die Verifikation erfolgreich, so kann mit der Validation des Modells fortgefahren werden, sonst muss die Modellumsetzung angepasst werden.



**Abb. 13: Durchführung von Simulationen (vgl. [BCN99])**

**Validation:** Bei der Validation wird geprüft, ob die Modellumsetzung auch eine akkurate Abbildung des zu untersuchenden Systems ist. Üblicherweise ist dieser Schritt ein iterativer Prozess, bei dem das Modell mit dem tatsächlichen Verhalten des Systems abgeglichen wird. Dabei werden Unterschiede zwischen realem System und Modellumsetzung identifiziert und das Modell weiter verfeinert und gegebenenfalls weitere Eingabedaten gesammelt. Gleichen sich Modellumsetzung und das tatsächliche System, so ist dieser Schritt abgeschlossen.

**Entwurf der Experimente:** Im Anschluss an die Validation werden die zu simulierenden Alternativen identifiziert. Für jede zu simulierende Systemalternative muss zudem entschieden wer-



den, wie lange die Simulation initialisiert werden soll, wie lange die Simulation selbst ist und wie oft die Simulation wiederholt werden muss, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

**Durchführung der Experimente:** Schließlich werden die Experimente wie im Entwurf konzipiert durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.

**Ergebnisprüfung:** An die Analyse der Experimentergebnisse schließt sich eine Prüfung der Ergebnisse an. Dabei wird zwischen drei Varianten unterschieden: Ist das Ergebnis nicht statistisch stichhaltig, da beispielsweise unterschiedliche Experimentläufe unterschiedliche Ergebnisse liefern, so müssen weitere Experimentläufe durchgeführt werden. Zeigen sich bei der Analyse der Experimente Phänomene, die mit den bisherigen Experimentergebnissen nicht erklärbar sind, die aber Teil der zu untersuchenden Fragestellung sind, so müssen zusätzliche Experimente entworfen und durchgeführt werden. Reichen die Ergebnisse der Simulationen schließlich aus, um die zu untersuchende Fragestellung statistisch stichhaltig zu beantworten, so kann das Simulationsexperiment beendet werden.

Insbesondere die Schritte Modellentwurf und Datensammlung sind bei der Analyse von Peer-to-Peer Systemen schwierig. Bei der Untersuchung anderer Fragestellungen, wie beispielsweise der Analyse der Effizienz von Anfrageoperatoren, kann auf Beobachtungen existierender Systeme, wie beispielsweise komplexer Datenbankinstallationen, zurückgegriffen werden. Dies ist bei der Entwicklung von Reputationsmechanismen für Peer-to-Peer Systeme nur schwer möglich. Hier beeinflusst das Verhalten menschlicher Teilnehmer den Erfolg der Strategien. Solches Verhalten kann entweder aus verhaltensökonomischen Modellen abgeleitet werden oder muss im Einzelfall beobachtet werden. Wird Verhalten beobachtet, so kann versucht werden dieses mit Hilfe von Spieltheorie zu formalisieren.

## 2.5.2 Formale Modellierung

Die Spieltheorie bietet die Möglichkeit der formalen Modellierung menschlichen Verhaltens. Wie bereits in Abschnitt 2.2 erläutert, muss dabei zunächst untersucht werden, welche Eigenschaften das Spiel besitzen muss, mit dem das entsprechende System untersucht wird. Dabei bieten sich verschiedene Unterscheidungsmöglichkeiten: Hierfür wird untersucht, über welche Information die Spieler verfügen. D.h. ob vollkommene bzw. unvollkommene Information besteht, also ob die Spieler die Züge aller Spieler in der Vorperiode kennen. Zudem wird untersucht, ob vollständige bzw. unvollständige Information vorherrscht, also ob die Spieler die Auszahlung ihrer Mitspieler kennen oder nicht. Schließlich wird zwischen einmaligen Spielen bzw. wiederholten Spielen unterschieden. Ist das Spiel wiederholt, so wird zwischen endlich und unendlich wiederholten Spielen differenziert. Sind diese Fragen geklärt, so kann das System als Spiel modelliert werden.

Die Spieltheorie erlaubt nicht nur die formale Modellierung, die Grundlage für Simulationen bilden kann. Sie kann auch genutzt werden, um mit dem entsprechenden Gleichgewichtskonzept das Gleichgewicht für ein System vorherzusagen. Das Gleichgewicht gibt dann über Spielergebnisse Aufschluss, in welchen keiner der Spieler einen Anreiz besitzt von seiner aktuellen Strategie abzuweichen, d.h. in welchen kein Spieler durch Änderung seiner Strategie die Möglichkeit hat seine Auszahlung zu erhöhen.

### 2.5.3 Empirische Studien

Spieltheoretische Modelle sowie Simulationsmodelle stützen sich auf Beobachtungen der Realwelt. Die Vorhersagekraft von Modellen ist nur dann groß, wenn das zu Grunde liegende Modell die Realität ausreichend beschreibt. Modelle können mit Feldstudien untermauert werden. Hierbei werden existierende Systeme untersucht und mit einem genutzten Modell verglichen. Werden Diskrepanzen zwischen Modell und beobachtetem Verhalten festgestellt, so wird das Modell erweitert.

Besonders Ökonomen ergänzen die Ergebnisse von Feldstudien durch Experimente im Labor (verhaltensökonomische Experimente). Wie bei Feldstudien ist das Ziel solcher Untersuchungen, die Überprüfung und Erweiterung existierender Modelle. Dabei bieten verhaltensökonomische Experimente gegenüber Feldstudien primär zwei Vorteile [BEG04, Gro07]:

- a) Bessere Kontrolle institutioneller Aspekte
- b) Untersuchung alternativer Institutionen

In der Praxis ist die Motivation der handelnden Akteure oft nicht offensichtlich. In verhaltensökonomischen Experimenten kann versucht werden mittels monetärer Anreize die Beweggründe für bestimmtes Handeln zu untersuchen (bessere Kontrolle institutioneller Aspekte). Die subjektiven Erwartungen der beteiligten Akteure können durch Zufallszüge erzeugt und kontrolliert werden. Weiterhin können Systeme, welche noch nicht in der Realwelt existieren, in verhaltensökonomischen Experimenten abgebildet und untersucht werden und somit qualitative Aussagen über das Verhalten der Akteure abgeleitet werden (Untersuchung alternativer Institutionen).

Ein weiterer Vorteil experimenteller Studien ist die Anwendbarkeit auf Systeme, die schwierige, mathematische Probleme aufwerfen und damit nicht formal lösbar sind [BEG04].

### 2.5.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Evaluierung komplexer Systeme ist nur durch die Kombination verschiedener Methoden möglich. Während die Spieltheorie genutzt werden kann, um das Verhalten menschlicher Akteure zu untersuchen, erlauben Simulationen die Untersuchung des Verhaltens von computergesteuerten Agenten. Dabei ist das Ziel spieltheoretischer Untersuchungen die Identifikation von Gleichgewichtszuständen, d.h. von Zuständen in welchen kein Teilnehmer einen Anreiz besitzt seine Strategie zu ändern. Simulationen untersuchen dagegen meist nicht den Gleichgewichtszustand selbst, sondern die Entwicklung eines Systems unabhängig von der Erreichung eines solchen Zustands. Beide Ansätze können jedoch voneinander profitieren: Zum Einen können Simulationen helfen Systeme zu untersuchen, welche für die Spieltheorie zu komplex sind (beispielsweise Systeme mit sehr vielen Teilnehmern), zum Anderen hilft die Spieltheorie bei der Vorhersage von für das System wünschenswerten Zuständen, z.B. von Zuständen, in welchen die Nutzen für das Gesamtsystem maximal ist.

Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie sich auf Modelle der Realwelt stützen. Diese wiederum müssen ausreichend validiert und verifiziert werden. Sowohl Ökonomen als auch Informatiker greifen dabei auf empirische Studien zurück. Diese bieten die in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Nachteile. Deshalb nutzen Ökonomen verhaltensökonomische Experimente zur Evaluierung. Wenngleich sich die Informatikforschung primär mit der Untersuchung von computergesteuer-

ten Knoten und nicht von menschlichen Teilnehmern beschäftigt, ist die Anwendung von verhaltensökonomischen Experimenten auch auf offene, verteilte Systeme interessant:

- a) Die Knoten in offenen, verteilten Systemen werden von Menschen realisiert und kontrolliert, die eigenen Nutzenbetrachtungen folgen.
- b) Forscher, seien es Biologen oder Soziologen, sind sich einig, dass die Evolution zu menschlichen Strategien führte, die ausgereift und ausgeklügelt sind [HaH06].
- c) Insbesondere bei Problemen, die sich mit der Vertrauensbildung zwischen computergesteuerten Systemen beschäftigen, bildet menschliches Verhalten die Grundlage von Algorithmen [Mar94].

Die in verhaltensökonomischen Experimenten beobachteten Strategien menschlicher Teilnehmer sind folglich eine viel versprechende Basis für den Entwurf von Strukturen, über welche menschliche Teilnehmer interagieren. Jedoch besitzen verhaltensökonomische Experimente den Nachteil, dass sie aus Kostengründen nur mit einer begrenzten Anzahl von menschlichen Teilnehmern durchführbar sind und dass sie nur für eine überschaubare Menge unterschiedlicher Szenarien, wie beispielsweise Systeme mit und ohne Feedback, genutzt werden können.

## 2.6 Evaluierung von Anreizmechanismen in Peer-to-Peer Systemen

Im Folgenden werden Arbeiten untersucht, welche den Erfolg der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Reputationssysteme untersuchen. Ein Kernpunkt der Untersuchung liegt auf den in Abschnitt 2.5 eingeführten Methoden, sowie deren Stärken und Schwächen im aktuellen Anwendungsfall.

### 2.6.1 Simulationen

Existierende Simulationen stützen sich auf die Überlegung, dass die Knoten durch unkooperatives Verhalten ihre Auszahlung erhöhen können. D.h. es wird untersucht, wie Angriffe in Peer-to-Peer Systemen verhindert werden können. Ein *Angriff* ist dabei das Verhalten eines Knoten, welches beim Systementwurf nicht gewünscht wurde. Abhängig vom zu untersuchenden Mechanismus werden unterschiedliche Fragestellungen betrachtet. So ist eine mögliche Fragestellung: Wie erfolgreich ist der Anreizmechanismus Feedback bei der Verhinderung von Freifahrerverhalten? Bzw. welchen Einfluss besitzt Freifahrerverhalten auf die Menge der angebotenen Daten? Neben diesen Fragestellungen wurden in der Literatur (s.u.) weitere Fragestellungen entwickelt, die unterschiedliche Angriffsszenarien untersuchen. Aus jedem Angriff ergeben sich zwei mögliche Fragestellungen: (1) Wie schädlich ist der Angriff für das System? (2) Wie kann ein bestimmter Anreizmechanismus mit diesem Angriff umgehen?

Zur Evaluation von Reputationssystemen in Peer-to-Peer Systemen existieren mehrere Arbeiten, die sich mit Simulationen beschäftigen. Leider folgt keine Arbeit dem vollständigen Vorgehensmodell, wie es in der Literatur vorgeschlagen wurde (siehe Abschnitt 2.5). Vielmehr konzentrieren sich existierende Arbeiten auf einzelne Teile des Vorgehens. Der Fokus liegt dabei zum einen auf dem Modellentwurf für das System bzw. für die Knoten und zum anderen auf der Durchführung von Simulationen selbst.

**Modellentwurf (System):** In der Literatur existieren verschiedene Arbeiten die sich mit der Erstellung eines Modells für Peer-to-Peer Systeme beschäftigen: Schlosser und Kamvar [ScK02] schlagen ein Modell für einen Simulator vor. Sie gehen dabei auf drei Aspekte ein:

1. Die Verteilung von Inhalten: z.B. Datenaufkommen und Art der Inhalte,
2. Das Verhalten der Knoten: z.B. Anfrageverhalten und Dauer der Verbindung und
3. Die Eigenschaften des Netzes: z.B. Struktur des Netzes und die Bandbreite zwischen den angeschlossenen Knoten.

Dabei stützen sie ihr Modell auf Studien existierender Systeme. Auf Basis dieser Arbeit können Simulationen und Analysen unterschiedlicher Reputationssysteme durchgeführt werden, die gleichzeitig die Vergleichbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse garantieren. Ge et al. [GFJ03] schlagen ein ähnliches Modell vor. Sie konzentrieren sich dabei auf die formale Beschreibung der einzelnen Modelleigenschaften und nutzen neben Beobachtungen existierender Systeme auch neuere Entwicklungen aus der Literatur. So erlaubt ihr Modell nicht nur die Betrachtung unstrukturierter Peer-to-Peer Netze, sondern auch strukturierter Systeme. Auch wenn die Ansätze den Fokus auf Dateitauschbörsen (siehe Kapitel 1) legen, lassen sich Teile der Modelle auf andere Anwendungsgebiete übertragen oder entsprechend erweitern. In der Folge der Arbeiten von Schlosser und Kamvar [ScK02] und Ge et al. [GFJ03] entstanden ähnliche Modelle mit Erweiterungen für alternative Netzwerktopologien (z.B. BitTorrent) [PNB04, GCX05].

**Modellentwurf (Benutzerverhalten):** Andere Arbeiten beschäftigen sich neben der Modellierung des Systems selbst mit der Modellierung von unerwünschtem Verhalten, also mit Angriffen. In diesem Zusammenhang wird auch von Freifahrerverhalten als Angriff gesprochen [BöB06, RaL03]. Um Anreize für kooperatives Verhalten zu schaffen, werden Reputationsmechanismen eingesetzt (siehe Abschnitt 2.4). Diese ermöglichen wiederum eine Vielzahl weiterer Angriffe:

- *Weißwaschen:* Teilnehmer können sich an das System anmelden und so lange Freifahrerverhalten betreiben, bis sie auf Grund ihrer Reputation keine Anfragen mehr beantwortet bekommen, anschließend können sie sich abmelden und wieder erneut anmelden (engl. white washing) [FPC06, FrR01].
- *Lügen:* In Systemen ohne zentrale Instanz hat jeder Teilnehmer einen Anreiz über Andere zu Lügen. Indem er die Reputation anderer verringert, kann er seine eigene Reputation (relativ zu Anderen) steigern [JuF04].
- *Kollaborationsattacken:* Bei Kollaborationsattacken kooperieren mehrere unterschiedliche Teilnehmer um mehr als die Teilnehmer, die nicht Teil der Kollaboration sind, vom System zu profitieren. Eine Variante von Kollaborationsattacken sind Sybil-Attacken. Hier meldet sich derselbe physische Teilnehmer mit mehreren verschiedenen Identitäten an [Dou02]. Er nutzt diese Identitäten dann, um die Reputation der von ihm gesteuerten Peers zu erhöhen, obwohl diese Freifahrerverhalten zeigen.

Alle anderen Angriffe sind Modifikationen der hier genannten Angriffe. Während alle in Abschnitt 2.4 eingeführten Anreizmechanismen prinzipiell Schutzmaßnahmen gegenüber Weißwaschen besitzen sollten, sind nur Ansätze, die Feedback nutzen, anfällig gegenüber Lügen und Kollaborationsattacken.

**Durchführung von Simulationen:** Andere Arbeiten konzentrieren sich primär auf die Durchführung von Simulationen zur Prüfung eines entwickelten Reputationsmechanismus. Solche Arbeiten legen den Fokus im Allgemeinen darauf, die Robustheit ihres Mechanismus gegen eine Teilmenge der möglichen Angriffe zu evaluieren. Die entsprechenden Arbeiten gehen dabei in unterschiedlicher Intensität auf die Gesamtheit der möglichen Angriffe ein. Im Folgenden

werden zunächst Arbeiten beschrieben, die auf eine überschaubare Menge von Angriffen eingehen, ehe Arbeiten, die eine Vielzahl von Angriffen berücksichtigen, vorgestellt werden.

Yu und Singh [YuS03] evaluieren die Qualität ihres Reputationsmechanismus durch die Simulation eines Systems mit 100 Knoten. Einer der Knoten ist Freifahrer. Sie zeigen, dass dieser Knoten gegeben eine von den Autoren festgelegte Strategie, weniger vom System profitiert als die anderen Knoten im Mittel. Das System eignet sich folglich zur Unterbindung von wenigen Freifahrern.

Jurca und Faltings [JuF03a, JuF03b] thematisieren den negativen Effekt von lügenden Knoten und zeigen formal, dass ihr Mechanismus robust gegenüber Lügen ist. In der Evaluation vergleichen sie den Erfolg von Knoten die ihren Mechanismus nutzen mit dem Erfolg von Knoten, die ihn nicht nutzen, auf der Basis einer von den Autoren festgelegten Kostenstruktur. Weiterhin zeigen sie, dass ihr Mechanismus Ehrlichkeit belohnt. Despotovic und Aberer [DeA04] führen für ihren Reputationsmechanismus ähnliche Analysen durch. Sie nutzen als Vergleichskriterium aber nicht eine bestimmte Kostenstruktur, sondern bestimmen den Anteil falscher Beobachtungen. Yu und Singh [YuS00] untersuchen neben dem Einfluss von lügenden Knoten auch den Einfluss eintretender Knoten. Ihre Simulationen zeigen, dass auch diese Knoten kooperatives Verhalten zeigen müssen, um gegen ihren Reputationsmechanismus vom System zu profitieren.

Spätere Arbeiten untersuchen neben dem Lügen auch Kollaborationsattacken. So zeigen Marti und Garcia-Molina [MaG04], dass Kollaborationsattacken die Performanz des Systems reduzieren. Sie schließen daraus, dass auch in verteilten, koordinatortreien Systemen eigene Beobachtungen notwendig sind, um die Qualität der anderen Knoten abzuschätzen. Papaioannou und Stamoulis [PaS05] nutzen deshalb eine zentrale Instanz, welche Knoten bestraft, wenn sich ihr Feedback vom Feedback anderer Knoten unterscheidet. Sie zeigen, dass ihr Ansatz selbst dann, wenn einzelne Knoten kollaborieren, um falsche Informationen zu verteilen, einen Vorteil für kooperatives Verhalten bietet. Han und Liu [HaL06] nutzen einen ähnlichen Ansatz mit ähnlichen Ergebnissen. Abrams et al. [AMP05] nutzen neben Feedback auch die Struktur des Netzes. Auch sie zeigen, dass ihr Mechanismus gegenüber Kollaborationsattacken resistent ist. Buchmann et al. [BBW06] nutzen ebenfalls die Struktur des Netzwerkes und zeigen in Simulationen, dass ihr Mechanismus robust gegenüber Kollaborationsattacken ist.

Kamvar et al. [KSG03a] nutzen weitere Angriffe. Sie zeigen, dass ihr Mechanismus auch erfolgreich gegenüber Spionen ist. Dies sind Knoten, die sich weitestgehend kooperativ verhalten und ihre Reputation nutzen, um unkooperative Knoten als positiv zu bewerten. Böhm und Buchmann [BöB06] untersuchen neben diesem Angriff noch das Beantworten von Anfragen mittels falscher Datenobjekte.

**Kritik:** Alle Simulationen unterscheiden sich in einigen zentralen Punkten. So nutzen sie meist unterschiedliche Peer-to-Peer Systeme (unstrukturierte bzw. unterschiedliche strukturierte), unterstellen verschiedene Zielfunktionen (z.B. unterschiedliche Kostenstrukturen) oder nutzen verschiedene Anzahlen von Knoten. Die in Arbeiten zum Modellentwurf vorgeschlagenen Modelleigenschaften und Modellannahmen werden hierbei nicht genutzt. Damit fehlt ein akzeptiertes Systemmodell zum Vergleich der Reputationsysteme. Zudem unterscheiden sich die unterschiedlichen Analysen auch in der Anzahl der Angriffe, die untersucht werden. Alle evaluierten Mechanismen sind immer robust gegenüber den betrachteten Angriffen. Dabei ist nicht klar, ob Evaluationen mit anderen Angriffen nicht durchgeführt wurden, da der Mechanismus nicht gegen diese Angriffe resistent ist, oder ob die Angriffe den Autoren nicht bekannt waren. Auch

ist die konkrete Implementierung der Reputationsmechanismen, welche für die Simulationen genutzt wurde, für keine der oben genannten Arbeiten verfügbar. Simulationen, die sich auf die Analyse von Angriffen konzentrieren, können somit nicht helfen zu entscheiden, welcher Reputationsmechanismus welchem anderen Mechanismus überlegen ist.

Eine weitere Einschränkung liegt in der Wahl der Angriffsstrategien. Diese Angriffe sind im Normalfall zwar theoretisch untersucht, das Auftreten der Angriffe in der Realwelt ist aber nicht immer beobachtet worden. So konnte zwar Freifahrerverhalten in existierenden unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen beobachtet werden, in strukturierten Systemen wurde solches Verhalten hingegen noch nicht beobachtet. Weitere Angriffe, wie Weißwaschen oder Kollaborationsattacken sind zwar theoretisch plausibel, konnten aber in existierenden Systemen nicht in dem Maße beobachtet werden wie beispielsweise Freifahrerverhalten. Damit sind entsprechende Analysen zumindest fragwürdig: Eine Validierung der Systeme bezüglich der benutzten Angriffsstrategien fehlt bisher.

Auch strategisches Verhalten der Knoten spielt bei den genannten Simulationen nur eine untergeordnete Rolle. So wird beispielsweise in [YuS03] nicht untersucht, welchen Anreiz Knoten haben falsche Angaben zu machen oder in [KSG03a] welchen Anreiz ein Spion hat die Reputation anderer Knoten zu erhöhen. Auch die Betrachtung von Freifahrerverhalten ist in diesem Zusammenhang kritisch: In den meisten Arbeiten wird Freifahrerverhalten als Angriffsstrategie „rationaler“, Nutzen maximierender Knoten betrachtet. Diese Betrachtungsweise legt nahe, dass kooperierende Knoten sich nicht rational verhalten. Wird davon ausgegangen, dass sich alle Knoten rational verhalten, so ist Freifahrerverhalten vielmehr die logische Konsequenz aus einem schlecht entworfenen Anreizsystem als ein Angriff: Knoten betreiben Freifahrerverhalten, wenn dieses Verhalten ihnen einen höheren Nutzen am System gibt, als kooperatives Verhalten. Diese Perspektive wirft die Frage auf, warum in den beobachteten Systemen ein beträchtlicher Teil der Knoten Dateien bereitstellt [AdH00]. Weiterhin impliziert die Unterscheidung von kooperativen Knoten und Angreifern, dass ein Teil der Knoten Software nutzt, wie sie vom Designer des Reputationsmechanismus vorgeschlagen wird, während ein anderer Teil der Knoten versucht das System zu stören. Shneidman und Parkes [ShP03] gehören zu den ersten, die Vorschläge alle Knoten eines Peer-to-Peer Systems als rationale Nutzen-Maximierer zu betrachten, die ihre Strategie so wählen, dass sie den maximalen Nutzen aus einem System ziehen. Feldman et al. [FLS04] führen entsprechende Simulationen durch. In ihrer Simulation passen die Knoten ihre Strategie immer so an, dass sie mit ihrer Strategie einen für sich maximalen Nutzen erreichen. Sie wechseln dafür zwischen verschiedenen Strategien, wie Freifahrerverhalten und kooperativem Verhalten. Diese Art der Untersuchung wird aber von den meisten anderen Ansätzen nicht genutzt.

Bezogen auf das empfohlene Vorgehen bei der Durchführung von Simulationen haben die Arbeiten zu Reputationssystemen für Peer-to-Peer Systemen somit einige Schwächen: So beschränkt sich die Datensammlung und der Modellentwurf meist auf die Erwartungen des Entwicklers. Wie sich Knoten in Peer-to-Peer Systemen tatsächlich verhalten, bleibt außen vor. Bei der Modellumsetzung wird damit ein vom Entwickler beeinflusstes Modell genutzt. Dass dieses schließlich bei der Durchführung der Experimente die bei der Formulierung des Problems gestellten Erwartungen des Entwicklers bestätigt, ist nicht überraschend. Die Aussagekraft von Simulationen in diesem Kontext ist damit zumindest fragwürdig.

## 2.6.2 Spieltheoretische Analyse

Feldman et al [FLS04] untersuchen das Anreizproblem in Peer-to-Peer Systemen. Um ihre Arbeit zu motivieren, analysieren sie Peer-to-Peer Systeme mit Hilfe von Spieltheorie. Sie vergleichen dabei Peer-to-Peer Systeme mit dem Gefangenendilemma (siehe Abschnitt 2.2): In ihrem Modell spielt ein Klient mit dem Dienstgeber. Feldman et al. nehmen dabei an, dass der Klient eine Anfrage stellen muss und lediglich der Dienstgeber die Wahl zwischen Bearbeitung der Anfrage und Ignorieren der Anfrage besitzt. Dabei dominiert für den Dienstgeber das Ignorieren der Anfrage das Beantworten der Anfrage, da das Spiel nicht wiederholt wird und für das Beantworten der Anfrage Kosten entstehen. Die Autoren leiten daraus den Bedarf eines Reputationsystems ab und führen ein solches ein.

Feldman und Chang wenden in einem späteren Papier [FeC05] die Entscheidungsfunktion „Image“ [NoS98] auf einfache Peer-to-Peer Systeme an. Der einzelne Knoten entscheidet dabei basierend auf dem Ergebnis der letzten Interaktion des Absenders einer Anfrage, ob er kooperiert oder nicht. Dabei werden Aktionen aus weiter zurückliegenden Runden nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung weiter zurückliegender Runden, wie es die Betrachtung stationärer Gleichgewichte ermöglicht [KrW82], wird nicht durchgeführt. Die Abbildung dieses Modells auf Peer-to-Peer Systeme wurde zwar von Aberer und Despotovic [AbD05] vorgeschlagen, aber nie realisiert.

Während in der Literatur wiederholt vorgeschlagen wurde Mechanismusgestaltung (siehe Abschnitt 2.2) für die Untersuchung von Peer-to-Peer Systemen zu nutzen [ShP03, FeS02], existieren keine Arbeiten, die Mechanismusgestaltung auf Peer-to-Peer Systeme anwenden. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass, wie in diesem Abschnitt erläutert, schon das Erstellen aussagekräftiger spieltheoretischer Modelle schwierig ist.

**Kritik:** Bei der Untersuchung von Peer-to-Peer Systemen wird meist auf existierende Modelle (bevorzugt das Gefangenendilemma oder Erweiterungen davon [Buc06, FLS04]) zurückgegriffen. Diese werden dann an das Anwendungsszenario angepasst. So erläutern beispielsweise Feldman et al. [FLS04] das Gefangenendilemma sehr ausführlich, um dann davon ein 2x2-Spiel für Peer-to-Peer Systeme abzuleiten, welches den Eigenschaften des Gefangenendilemmas und damit den dazugehörigen Vorhersagen nicht mehr entspricht. Sinnvoller wäre hier die Erstellung neuer Modelle auf der Basis von Beobachtungen. Das entsprechende Vorgehen wird in Grundlagenbüchern zur Spieltheorie [FuT91] sehr anschaulich erläutert (vgl. Abschnitt 2.2). Dabei sollte zunächst überlegt werden, ob die Knoten im System ein Spiel mit vollkommener bzw. unvollkommener Information oder mit vollständiger bzw. unvollständiger Information spielen. Abhängig davon lässt sich das Spiel dann mit Hilfe eines Entscheidungsbaums modellieren. Der abgeleitete Entscheidungsbaum erlaubt dann die Bestimmung des Gleichgewichts. Wird zunächst von einem existierenden Modell ausgegangen, so führt dies meist zu falschen Ergebnissen: Das Modell wird so lange erweitert, wie die Vorhersagen noch zutreffend sind, ist dies nicht mehr möglich, wird oft falsch daraus geschlossen, dass die Spieltheorie nicht geeignet ist das untersuchte System zu analysieren (siehe z.B. [AbD05]).

## 2.6.3 Empirische Untersuchung

Mit empirischen Studien konnte gezeigt werden, dass mehr als 70% der Knoten bei Gnutella [AdH00] und ein Großteil der Knoten bei Napster [SGG02] Freifahrerverhalten zeigen. Beide Systeme besitzen keine Mechanismen gegen Freifahrerverhalten. Neuere Analysen [ZgA07] untersuchen bitTorrent und eMule. In diesen Systemen werden Knoten gezwungen eigene

Ressourcen in das System einzubringen abhängig von der Menge der Ressourcen, die sie vom System konsumiert haben. In diesen Systemen haben die Anreizmechanismen nicht den gewünschten Effekt: Ein Großteil der Knoten stellt genau so viel zur Verfügung, dass er gerade am System partizipieren kann.

Verhaltensökonomische Experimente zeigen, dass einige Teilnehmer kooperatives Verhalten zeigen, ohne die anderen Teilnehmer zu kennen [KeW00]. In entsprechenden Experimenten ist der Anteil der unkooperativen Teilnehmer, also der Freifahrer, jedoch hoch (ca. 55%). Nur wenige Teilnehmer (ca. 3%) bringen sich in hohem Maße in das System ein. Diese Beobachtung deckt sich mit den Beobachtungen aus empirischen Studien existierender Peer-to-Peer Systeme. Auch dort ist der Anteil der Freifahrer verglichen zum Teil der kooperativen Knoten hoch. Wird den Teilnehmern ein Reputationsmechanismus, wie Feedback [SeS01] oder eigene Beobachtungen des Verhaltens anderer [KeW00], zur Verfügung gestellt, so steigt der Anteil der Teilnehmer, die sich kooperativ verhalten.

**Kritik:** Während Feldstudien sehr zuverlässig bezüglich der Qualität eines Anreizmechanismus sind – hier wird die Auswirkung des Anreizmechanismus auf das Verhalten menschlicher Teilnehmer direkt beobachtet –, bieten sie doch einen gravierenden Nachteil: Es ist nicht möglich verschiedene Anreizmechanismen zu evaluieren und zu vergleichen. Der Forscher ist stets an die bereits existierenden Lösungen gebunden. Daher wurden alternative Ansätze entwickelt, um Anreizmechanismen in Peer-to-Peer Systemen zu untersuchen. Verhaltensökonomische Experimente bieten hierfür einen Ausweg. Mit ihrer Hilfe kann das untersuchte System im Labor nachgebildet und der Einfluss unterschiedlicher Mechanismen untersucht werden. Jedoch existieren bisher nur Experimente zu abstrakten ökonomischen Spielen. Diese zeigen teilweise ähnliche Ergebnisse wie sie in Feldstudien beobachtet werden, die Übertragbarkeit, insbesondere auf strukturierte Peer-to-Peer Systeme, kann aber nicht allgemein festgestellt werden.

#### **2.6.4 Zusammenfassung und Bewertung**

Wenngleich eine Vielzahl von Arbeiten zu unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen existieren, so ist die Grundidee der meisten Arbeiten gleich: Die Knoten tauschen Feedback aus und beobachten das System. Auf Basis dieser Informationen wird dann entschieden, ob mit einem anderen Knoten kooperiert wird oder nicht. Dieses Grundprinzip wurde bereits in der Dissertation von Marsh [Mar94] für Multi-Agenten-Systeme vorgeschlagen und hat sich seither nicht verändert.

Unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme haben in der Vergangenheit viel Aufmerksamkeit erhalten. Für diese Art von Systemen existieren verschiedene spieltheoretische Untersuchungen und Arbeiten mittels Simulationen, die sowohl Freifahrerverhalten, als auch kooperatives Verhalten erklären. Die Arbeiten in diesem Bereich bezüglich des Verhaltens von Menschen decken sich mit den Beobachtungen von Feldstudien und verhaltensökonomischen Experimenten ähnlicher Szenarien. In dieser Art von Systemen gilt, dass durch konditionelle Kooperation, also durch Kooperation ausschließlich mit Knoten, die sich bereits in das System eingebracht haben, Freifahrerverhalten unterbunden werden kann. Da Knoten in unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen nicht wiederholt miteinander interagieren und keine zentrale Instanz existiert, können sich die Beurteilungen anderer Knoten nur auf Feedback stützen. Ökonomen und Informatiker (siehe die im vorangegangenen Abschnitt zitierten Arbeiten) sind sich für diesen Fall darüber einig, dass dies zu einer Steigerung der Kooperativität aller führt. Unabhängig von der jeweiligen Realisierung erlaubt Feedback folglich die Steigerung der Kooperativität.



Für strukturierte Peer-to-Peer Systeme gilt dies jedoch nicht automatisch. Hier existiert neben der Möglichkeit Feedback zu nutzen, die Möglichkeit auf Erfahrungen mit den eigenen Nachbarn und auf die Struktur des Systems zurückzugreifen. Zwar wurde in der Vergangenheit mittels Simulationen untersucht, wie sich Knoten in solchen Systemen verhalten [BuB04a]. Es existieren jedoch keine empirischen Studien zum Verhalten von Menschen in solchen Systemen. Auch verhaltensökonomische Experimente mit ähnlichen Systemen wurden noch nicht durchgeführt. In der Vergangenheit wurde entweder untersucht, wie Fremde miteinander interagieren oder welches Verhalten einander bekannte Menschen zeigen. Der Einfluss, den die Struktur der Interaktion auf das Weiterleiten von Nachrichten besitzt, wurde bisher jedoch nicht untersucht.

## 2.7 Offene Fragen

In Abschnitt 2.1 wurden zunächst unterschiedliche Systemarchitekturen vorgestellt. Anschließend wurde in Abschnitt 2.2 das Anreizproblem mit Hilfe von Spieltheorie eingeführt. In Abschnitt 2.3 wurde gezeigt, dass insbesondere in Systemen ohne zentrale Kontrolle ein Anreizproblem besteht. Knoten können sich unkooperativ verhalten, d.h. keine Dienste für andere bereitstellen, ohne dass die anderen Knoten dies beobachten können. Um diesem Problem zu begegnen, wurden in Abschnitt 2.4 verschiedene Reputationssysteme vorgestellt. Zur Evaluation solcher Systeme existieren unterschiedliche Methoden (siehe Abschnitt 2.5). Während Ökonomen sich bei der Evaluation darauf konzentrieren, mittels Spieltheorie Gleichgewichte für das System zu bestimmen, untersuchen Informatiker meist mittels Simulation die Reaktion des Systems auf Angriffe. Um stichhaltige Simulationen und spieltheoretische Modelle ableiten zu können, können Feldstudien oder verhaltensökonomische Experimente herangezogen werden. Anhand existierender Arbeiten wurde schließlich in Abschnitt 2.6 erläutert, welche Nachteile und Vorteile die unterschiedlichen Methoden besitzen.

Die Kombination aller Methoden ist vielversprechend. Insbesondere für strukturierte Peer-to-Peer Systeme müssen Simulationen auf Modelle und Daten zurückgreifen, die vom Entwickler vorgegeben sind. Verhaltensökonomische Experimente können dabei helfen, das Verhalten menschlicher Teilnehmer in dieser Art von Systemen zu untersuchen. Mittels Spieltheorie kann das beobachtete Verhalten dann modelliert werden. Weiterhin lassen sich mit der Spieltheorie erste Vorhersagen bezüglich solcher Systeme treffen. So kann formal untersucht werden, wie hoch die Effizienz im System ist. Entsprechende Modelle haben den Vorteil, dass sie das Verhalten von Menschen beschreiben und nicht auf die Betrachtung vorhandener Modelle beschränkt sind. Dies ist besonders wünschenswert, da die Verhinderung von theoretisch möglichem Verhalten, das nicht auftritt, zu einer Verringerung der Effizienz eines Systems führt [GAA05], ohne dass das System selbst davon profitiert. Zudem helfen sowohl Simulationen als auch spieltheoretische Modelle den Nachteilen von verhaltensökonomischen Experimenten zu begegnen. Beides erlaubt die Untersuchung von Systemen mit sehr vielen Knoten. Im Gegensatz zu spieltheoretischen Modellen erlauben Simulationen auch das Untersuchen von Systemen, die sich nicht in einem Gleichgewichtszustand befinden. Solche Untersuchungen sind insbesondere bei Peer-to-Peer Systemen essentiell. Hier ändert sich die Menge der Knoten kontinuierlich.

In den Folgenden Kapiteln wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Reputationsmechanismen auf das Verhalten menschlicher Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen haben. Dabei wird auf die drei in Abschnitt 2.5 eingeführten Methoden, empirische Untersuchungen, spieltheoretische Modelle und Simulationen zurückgegriffen.



### **3 Verhaltensökonomische Betrachtung strukturierter P2P Systeme**

In diesem Kapitel wird das Verhalten menschlicher Teilnehmer, die Knoten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen steuern, untersucht. Dabei wird auf verhaltensökonomische Experimente zurückgegriffen. Diese werden in drei Schritten durchgeführt:

1. In einem ersten Schritt werden spieltheoretische und verhaltensökonomische Modelle untersucht und auf ihre Vergleichbarkeit zu strukturierten Peer-to-Peer Systemen geprüft. Ziel verhaltensökonomischer Untersuchungen ist es unter Anderem existierende theoretische Modelle weiterzuentwickeln [Smi94]. Um diesem Schritt gerecht zu werden, muss zunächst dargelegt werden, welche Vorhersagen die Theorie für ähnliche Systeme trifft. Auf der Basis dieser Modelle werden Hypothesen für das Verhalten menschlicher Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen abgeleitet.
2. Im zweiten Schritt werden menschliche Teilnehmer mit den Entscheidungssituationen eines Knoten konfrontiert und deren Verhalten in diesen Entscheidungssituationen beobachtet.
3. Die Ergebnisse der im zweiten Schritt durchgeführten Experimente werden dann in einem dritten Schritt ausgewertet. Ziel dieser Auswertung ist es, die aufgestellten Hypothesen zu widerlegen oder zu bestätigen.

Dieses Kapitel folgt dieser Gliederung: Zunächst werden in Abschnitt 3.1 angrenzende spieltheoretische und verhaltensökonomische Modelle beschrieben und von diesen Hypothesen für Peer-to-Peer Systeme abgeleitet. Um diese Hypothesen prüfen zu können, werden in Abschnitt 3.2 verhaltensökonomische Experimente entworfen. Die Ergebnisse der Durchführung dieser Experimente werden in Abschnitt 3.3 beschrieben. Schließlich werden die Implikationen der Ergebnisse für die Entwicklung von strukturierten Peer-to-Peer Systemen in Abschnitt 3.4 diskutiert.

#### **3.1 Modelle und Hypothesen**

Im Folgenden werden Hypothesen für das Verhalten menschlicher Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen hergeleitet. Dabei wird zunächst nur der Fall betrachtet, in welchen die Teilnehmer Daten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen austauschen und ihre Kontakte beobachten können. Arbeiten aus der Verhaltensökonomie (siehe z.B. [BDM95, BKO04, FeG01]) zeigen, dass Vertrauen und Reziprozität, also das Motto „Wie du mir, so ich dir!“, das Verhalten von interagierenden Menschen in sehr vielen Situationen beeinflussen. Daher beschäftigen sich die ersten Modelle mit den Aspekten Vertrauen und Reziprozität (siehe Abschnitt 3.1.1) [SBS06a, SBS06b]. Anschließend werden Hypothesen abgeleitet, wie Reziprozität in strukturierten Peer-to-Peer Systemen sichergestellt werden kann und welchen Einfluss reziprokes Verhalten auf den Anteil an Freifahrern im System besitzt (siehe Abschnitt 3.1.2) [SBV07a]. Danach wird in Abschnitt 3.1.3 untersucht, welchen Einfluss Feedback laut anderen verhaltensökonomischen Experimenten auf die Strategien der Teilnehmer besitzt [SBV07b]. Es ist ein Kernziel in strukturierten Peer-to-Peer Systemen die Effizienz des Systems zu maximieren. Daher werden schließlich in Abschnitt 3.1.4 Modelle diskutiert, die sich mit dem Erreichen eines effizienten Systemzustandes beschäftigen. Dabei wird auch darauf eingegangen, welchen Einfluss Teilnehmer mit unterschiedlichen Nutzenstrukturen besitzen.

### 3.1.1 Vertrauen und Reziprozität

In diesem Abschnitt werden verschiedene Ergebnisse aus der Verhaltensökonomie zu Vertrauen und Reziprozität vorgestellt, welche als Ausgangssituation für die Untersuchung menschlichen Verhaltens in strukturierten Peer-to-Peer Systemen dienen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden dabei Hypothesen für das Verhalten von Teilnehmern in strukturierten Peer-to-Peer Systemen begründet.

**Investitionsspiel:** Um Kooperation menschlicher Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen besser zu verstehen, wird das Peer-to-Peer System mit dem Investitionsspiel [BDM95] verglichen. In diesem Spiel werden die Spieler in zwei Gruppen aufgeteilt (Gruppe A und Gruppe B). Anfangs bekommen die Spieler in Gruppe A ein Startguthaben von 10 Geldeinheiten. Jeder Spieler 1 in Gruppe A kann dann einen Teil seines Guthabens an einen ihm unbekanntem Spieler 2 in Gruppe B geben („investieren“). Der Experimentator verdreifacht den investierten Betrag und gibt ihn an Spieler 2. Sowohl die Spieler in Gruppe A als auch die Spieler in Gruppe B wissen von der Erhöhung des investierten Kapitals. Der Spieler 2 entscheidet dann in einem letzten Schritt, welchen Teil des Geldes er an Spieler 1, sein Gegenüber in Gruppe A, zurückzahlt und welchen Teil des Geldes er für sich selbst behält.

Das Investitionsspiel wird nicht wiederholt und alle Spieler besitzen vollkommene und vollständige Information. Die Lösung für das Investmentsspiel lässt sich somit durch Rückwärtsinduktion (siehe Abschnitt 2.2.4) lösen: Nach dem Zug des Spielers in Gruppe B (Spieler 2) endet das Spiel. Er hat damit keine Kompensation des an den Spieler in Gruppe A (Spieler 1) gezahlten Betrags zu erwarten. Eine Rückzahlung verringert lediglich seinen Nutzen. Spieler 1 muss dieses Verhalten erwarten. Für ihn ist es damit die beste Strategie nichts an Spieler 2 zu geben und das gesamte Startguthaben zu behalten. Ein teilspielperfektes Gleichgewicht ist also erreicht, wenn Spieler 1 nichts investiert und Spieler 2 kein Geld zurückzahlt. Die effiziente Lösung des Spiels ist jedoch, dass Spieler 1 sein gesamtes Startguthaben (10 Geldeinheiten) investiert. Spieler 2 sollte dann, auf Grund von Fairness, die Hälfte des erhaltenen Investments (30 Geldeinheiten) an Spieler 1 zurückgeben. Somit hätten beide Spieler nach dem Spiel ein Guthaben von 15 Geldeinheiten.

In verhaltensökonomischen Experimenten des Investitionsspiels zeigen Berg et al. [BDM95], dass das effiziente Ergebnis erreicht wird. Dieses Ergebnis wird mit Vertrauen und Reziprozität erklärt: In dem Moment, in dem Spieler 1 investiert, zeigt er Vertrauen in Spieler 2. Spieler 2 zeigt dann reziprokes Verhalten, indem er einen Teil seines Einkommens zurückgibt. Kooperation in sozialen Dilemmas lässt sich somit auf zwei Motive zurückführen: Vertrauen und Reziprozität.

Die Grundentscheidungen der Spieler im Investitionsspiel entsprechen den Entscheidungen in einem Peer-to-Peer System. Wenn ein Teilnehmer in einem Peer-to-Peer System eine Anfrage abschickt also am System teilnimmt, hat er dadurch Kosten. Diese Kosten entstehen zum Einen durch die Kosten für das Abschicken der Anfrage, sie resultieren aber auch aus anderen Kosten, wie z.B. das Vorhalten von Daten. Er investiert also in gewisser Weise in das System. Ein anderer Teilnehmer kann schließlich die Anfrage weiterleiten oder Beantworten. Dies führt zum Erhalt des Anfrageergebnisses für den Absender der Anfrage. Der Erhalt der Anfrage überkompensiert die Investition für das Abschicken der Anfrage. Dadurch, dass ein Teilnehmer in einem strukturierten Peer-to-Peer System beobachten kann, ob seine Anfragen auch beantwortet werden, kann das Weiterleiten und Beantworten von Anfragen auch als Investition betrachtet wer-

den: Durch das Bearbeiten eingehender Anfragen investiert der Teilnehmer in seine Reputation und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit, dass seine Anfragen bearbeitet werden.

**Verhalten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen:** Vom Investitionsspiel lassen sich zwei Hypothesen für Vertrauen und Reziprozität in strukturierten Peer-to-Peer Systemen ableiten:

*Hypothese Vertrauen:* Zwischen dem Vertrauen der Teilnehmer in das System und der durchschnittlichen Auszahlung der Teilnehmer besteht eine positive Korrelation.

Diese Hypothese deckt sich mit den Beobachtungen zu Vertrauen im Investitionsspiel. Je mehr ein Teilnehmer dem System vertraut, umso höher ist seine Kooperation. Dies führt zu höheren mittleren Auszahlungen der einzelnen Teilnehmer. Vertrauen kann dabei als die Anzahl der Anfragen, die ein Teilnehmer verschickt, betrachtet werden. Je mehr Anfragen ein Teilnehmer verschickt, umso mehr vertraut er in das System.

*Hypothese Reziprozität:* Die Strategien der Teilnehmer sind personalisiert, d.h. sie basieren auf der Identifikation jedes einzelnen Knotens und nicht auf den Aktionen des Systems als Ganzes.

Diese Hypothese berücksichtigt das Argument der Reziprozität. Reziprozität sollte sich auf die Aktionen anderer Knoten in der Vergangenheit beziehen. Wenn die Anfragen eines Knotens von einem anderen Knoten beantwortet wurden, so wird er auch die Anfragen des anderen Knoten beantworten. Die Hypothese gilt nicht für unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme (wie Dateitauschbörsen): Reziprozität lässt sich nur realisieren, wenn einzelne Teilnehmer wiederholt miteinander interagieren. In unstrukturierten Peer-to-Peer Systemen ist dies nicht der Fall. Dort finden Interaktionen nicht wiederholt statt.

### 3.1.2 Schwellwertstrategien und Freifahrer

Ausgehend von der Erwartung, dass sich die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen reziprok verhalten, bleibt zu untersuchen wie in einem strukturierten Peer-to-Peer System Reziprozität umgesetzt wird. Hier können die Teilnehmer, anders als im Investitionsspiel, nicht nur an einer Interaktion mit einem anderen Teilnehmer teilnehmen, sondern in mehreren aufeinander folgenden Interaktionen mit mehreren Teilnehmern. Das Dienstmodell von Hens und Vogt [HeV02] berücksichtigt das.

**Dienstmodell von Hens und Vogt:** Die Spieler im Dienstmodell von Hens und Vogt können sich in einem von zwei unterschiedlichen Zuständen befinden: Im Zustand A können sie einen Dienst für andere bereitstellen, in Zustand B können sie einen von einem anderen Spieler bereitgestellten Dienst konsumieren. Durch das Bereitstellen eines Dienstes verliert ein Spieler Nutzen, während das Konsumieren eines Dienstes den Nutzen des Spielers erhöht. Dabei ist der betragsmäßige Nutzen für das Konsumieren eines Dienstes höher als der Nutzen für das Bereitstellen eines Dienstes.

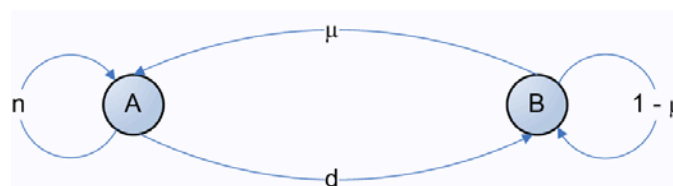


Abb. 14: Strategische Optionen im Dienstmodell von Hens und Vogt [HeV02]

Das Dienstmodell von Hens und Vogt ist rundenbasiert, um die zeitliche Entwicklung der Strategien der Spieler zu untersuchen. Zu Beginn des Experiments wird jedem Spieler ein Zustand zugewiesen. Dabei wird darauf geachtet, dass gleich viele Spieler in Zustand A wie in Zustand B sind. In jeder Runde können die Spieler in Zustand A einen Dienst anbieten (d) oder nicht (n). Ein Spieler in Zustand B kann nicht zwischen verschiedenen Aktionen wählen: Er ist stets daran interessiert einen Dienst zu konsumieren, da dies seinen Nutzen erhöht. Am Ende jeder Runde wird ein Spieler in Zustand A, der einen Dienst angeboten hat, zufällig einem Spieler in Zustand B zugeordnet. Bieten alle Spieler in Zustand A einen Dienst an, so kann jeder Spieler in Zustand B einen Dienst konsumieren. Andernfalls wird ein Teil  $\mu$  der Spieler in Zustand B zufällig ausgewählt. Diese Spieler erhalten einen der angebotenen Dienste, die anderen Spieler in Zustand B nicht. Die Spieler, die einen Dienst angeboten haben, und die Spieler, die einen Dienst konsumiert haben, wechseln nun in den jeweils anderen Zustand. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass auch in allen Folgerunden gleich viele Spieler in Zustand A wie in Zustand B sind. Abb. 14 visualisiert das Spiel.

Das Ende des Spiels wird im Dienstmodell nicht im Voraus festgelegt. Dies entspricht Beobachtungen aus der experimentellen Wirtschaftsforschung. In diesem Fall verhalten sich Teilnehmer, als würde das Spiel für unendlich viele Runden fortauern [SeS86]. Es ist daher auch davon auszugehen, dass sich Teilnehmer in einem strukturierten Peer-to-Peer System so verhalten als würden sie für immer spielen.

In dem Dienstmodell von Hens und Vogt wird zwischen zwei Runden der Nutzen jedes Spielers diskontiert. D.h. der Nutzen durch das Konsumieren eines Dienstes in einer zukünftigen Runde ist geringer als der Nutzen für das Konsumieren in der aktuellen Runde. Würde kein Abzinsfaktor eingeführt, so wäre es aus Sicht eines Knoten egal, wann er einen Dienst erhalten würde – der Nutzen für das Konsumieren des Dienstes wäre immer gleich. Da der Nutzen für das Konsumieren des Dienstes höher ist als die Kosten für die Bereitstellung des Dienstes, wäre es dann rational in Zustand A immer einen Dienst anzubieten. Kooperation wäre die dominante Strategie. Durch Einführung der Diskontierung ist das Ergebnis des Spiels weniger offensichtlich: Sei ein Spieler über mehrere Runden in Zustand B und habe einen hohen Abzinsfaktor. So ist der Nutzen für das Konsumieren eines Dienstes und damit für das Wechseln in Zustand A gering. Dieser Nutzen kann dann geringer sein, als der Betrag des Nutzens für das Anbieten eines Dienstes, um in Zustand B zurückzukehren.

Hens und Vogt [HeV02] zeigen mit Hilfe eines spieltheoretischen Modells, wann genau Kooperation rational ist. Kooperation ist genau dann rational, wenn der erwartete, abgezinste Nutzen in der Zukunft im Betrag höher ist als der Nutzen für das Bereitstellen des Dienstes in der aktuellen Runde. Ist die Anzahl der Runden beschränkt, so kann Rückwärtsinduktion genutzt werden, um das Gleichgewicht für das Spiel zu finden. In diesem Fall ist unkooperatives Verhalten rational: Jeder Spieler kennt die letzte Runde. In dieser Runde lohnt es sich für den Spieler in Zustand A nicht einen Dienst anzubieten, da er nicht erwarten kann in Zukunft einen Dienst zu konsumieren. Der Spieler in Zustand B weiß das und würde aus diesem Grund in der vorangehenden Runde, wenn er in Zustand A ist, auch keinen Dienst mehr anbieten. Dies gilt für sämtliche vorhergehenden Runden, so dass es sich auch in der ersten Runde für keinen der Spieler lohnt einen Dienst anzubieten. Wird von einer unendlichen Anzahl Runden ausgegangen, so wird die Strategie mit Hilfe stationärer Gleichgewichte bestimmt (vgl. Abschnitt 2.2.6). Hens und Vogt [HeV02] zeigen, dass der Parameter, welcher den Unterschied zwischen kooperativem und unkooperativem Verhalten eines Teilnehmers macht, der Anteil der Dienstanfragen, die wie gewünscht bearbeitet wurden, ist. Liegt dieser Anteil über einem bestimmten Schwellwert, so kooperiert der Spieler. In diesem Fall wird von einer Schwellwertstrategie gesprochen.

Ein anderes Ergebnis der Arbeit von Hens und Vogt [HeV02] ist, dass in einem System, in welchem die Spieler Schwellwertstrategien spielen, Freifahrerverhalten eines Spielers nicht zu einem Zusammenbruch des Gesamtsystems führt. Dies ist darin begründet, dass selbst in der Gegenwart eines Freifahrers die anderen Spieler noch eine positive Auszahlung erhalten.

Die strategischen Zustände dieses Modells entsprechen den Zuständen, die ein Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen einnehmen kann. Entweder tritt der Teilnehmer als Dienstgeber auf (Zustand A), indem er Anfragen anderer Knoten beantwortet oder weiterleitet, oder der Teilnehmer übernimmt die Rolle eines Klienten (Zustand B), indem er Antworten auf von ihm versandte Anfragen empfängt. Auch die Wiederholung des Spiels über mehrere Runden ist ähnlich strukturierten Peer-to-Peer Systemen: Wie im Dienstmodell nimmt jeder Teilnehmer wiederholt die Rolle des Dienstgebers und die Rolle des Klienten an. Jeder Teilnehmer in einem strukturierten Peer-to-Peer System kann Anfragen beantworten, also einen Dienst bereitstellen, oder eine Anfrageergebnis empfangen, also einen Dienst konsumieren. Damit kann das Modell von Hens und Vogt als Vereinfachung der Interaktionen in einem strukturierten Peer-to-Peer System betrachtet werden. Ist die Zahl der Knoten, die Dienste bereitstellen geringer als die Zahl der Knoten die Dienste konsumieren, so werden einzelne Anfragen nicht bearbeitet.

**Verhalten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen:** Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen die Gleichgewichtsstrategie aus dem Modell von Hens und Vogt nutzen. Dies führt zu den folgenden Hypothesen:

*Hypothese Schwellwertstrategien:* Ist die Anzahl der Anfragen, die beantwortet werden, geteilt durch die Anzahl der Anfragen, die in der Vergangenheit abgeschickt wurden, oberhalb eines bestimmten Schwellwerts, so kooperieren die Teilnehmer. Andernfalls wird ein Teilnehmer weder Anfragen weiterleiten und beantworten noch eigene Anfragen abschicken.

Das Modell von Hens und Vogt sagt auch voraus, das Freifahrerverhalten nicht zu einem Zusammenbruch des Systems führt, wenn alle Spieler Schwellwertstrategien spielen. Dies führt zur folgender Hypothese:

*Hypothese Freifahrer ohne Zusammenbruch:* Freifahrerverhalten eines Anteils von  $1/n$  aller Teilnehmer im System führt nicht zum Zusammenbruch des Systems.

Dabei sei  $n$  die Anzahl der Knoten im System. Die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Experimentergebnisse zeigen, dass dieses Ergebnis für  $n = 6$  gilt.

### 3.1.3 Feedback und Bestrafung

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 motiviert, kann Feedback genutzt werden, um die Einschätzung des Verhaltens anderer Teilnehmer weiter zu verbessern. Ziel dabei ist die zuverlässige Bestrafung unkooperativen Verhaltens anderer Teilnehmer. Im Folgenden werden unterschiedliche Arbeiten von Verhaltensökonomien zur Motivation von Kooperation und deren Anwendbarkeit auf strukturierte Peer-to-Peer Systeme diskutiert. Fokus liegt dabei auf dem Einfluss von Feedback.

**Öffentliches Gut Spiel mit Bestrafung:** Bestrafung ist ein effektives Mittel, um Kooperation sicherzustellen. Fehr und Gächter [FeG02] untersuchten den Einfluss von Bestrafung mit dem folgenden öffentlichen Gut Experiment: Eine Gruppe von vier Spielern erhält zu Beginn des

Experiments ein Startguthaben von 20 Geldeinheiten. Jeder Spieler kann dann einen Teil seines Guthabens in ein Gruppenprojekt investieren. Der übrige Teil des Guthabens verbleibt beim Spieler. Für jede Geldeinheit, die von einem der Spieler in das Gruppenprojekt investiert wurde, erhält jeder Spieler der Gruppe dann 0,4 Geldeinheiten. Während der Nutzen des Investors pro investierte Geldeinheit geringer ist als seine Investition (0,4 Geldeinheiten), ist der Nutzen für die gesamte Gruppe höher (1,6 Geldeinheiten). Aus Sicht des Spielers ist es optimal das Geld zu behalten – unabhängig von der Höhe des Betrags, den die anderen Spieler in das Gruppenprojekt investiert haben. Diese Strategie führt aber nicht zu Effizienz. Während jeder Spieler 20 Geldeinheiten verdient, wenn niemand investiert, ist die Auszahlung der Spieler bei voller Kooperation 32 Geldeinheiten.

Fehr und Gächter führten zwei Varianten dieses Experiments durch: Eine Variante des Experiments entsprach dem beschriebenen Modell, in einer weiteren Variante hatten die Teilnehmer die Möglichkeit andere Teilnehmer zu bestrafen. Für die Variante mit Bestrafung wurde der Experimentaufbau wie folgt geändert: Nach den Investitionen wurde jeder Spieler über die Höhe der Investition anderer Spieler informiert. Danach konnten die Spieler andere Spieler bestrafen. Für die Bestrafung musste ein Spieler dem zu bestrafenden Spieler eine Zahl von Punkten (zwischen 0 und 10) zuweisen. Für jeden Punkt wurde das Guthaben des bestrafenden Spielers um drei Geldeinheiten verringert. Zudem wurde das Guthaben des Bestrafenden pro Punkt ebenfalls um eine Geldeinheit reduziert.

Mehrere Gruppen von Teilnehmern spielten dieses Spiel gleichzeitig. Das Spiel wurde wiederholt. Nach jeder Runde wurden zufällig neue Gruppen gebildet. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Teilnehmer wiederholt miteinander in einer Gruppe waren. Auf diese Weise konnten Effekte wie direkte Reziprozität [Tri71], also die Kooperation mit Teilnehmern, welche zuvor kooperierten, oder Reputation vermindert werden, wie sie beispielsweise bei der Beobachtung der Kontakte in strukturierten Peer-to-Peer Systemen eintreten.

Aus ökonomischer Sicht ist es rational weder zu bestrafen noch zu kooperieren – weder Bestrafung noch Kooperation führen in der Zukunft zu zusätzlicher Auszahlung. Beides ist aber mit Kosten verbunden. Dennoch könnten andere Spieler in der Zukunft von Bestrafungen in der aktuellen Runde profitieren. Ein bestrafter Spieler könnte auf Grund der Bestrafung in der Zukunft höhere Beträge investieren. Das Vorhandensein von bestrafenden Spielern gäbe selbst egoistischen, rationalen Spielern einen Grund zu kooperieren. In entsprechenden verhaltensökonomischen Experimenten bestrafte ein großer Teil der Teilnehmer, andere Teilnehmer, die unkooperatives Verhalten zeigten [FeG02].

In Peer-to-Peer Systemen können auch Bestrafungen stattfinden: Wenn ein Peer defektiert, d.h. wenn er keine Anfragen bearbeitet, kann er sofort bestraft werden, indem seine Anfragen nicht bearbeitet werden. Diese Art der Bestrafung ist ohne zusätzliche Kosten möglich. Damit ist Bestrafung in Peer-to-Peer Systemen sogar noch wahrscheinlicher – dort müssen die Teilnehmer für Bestrafung zahlen. Schon die gemäß der Hypothesen in Abschnitt 3.1.2 sollen die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen bereit sein unkooperatives Verhalten zu bestrafen: Laut der Hypothesen sollten die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Schwellwertstrategien spielen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Bestrafung auch in strukturierten Peer-to-Peer Systemen den Grad an Kooperativität zwischen den Teilnehmern erhöht.

Im Gegensatz zu den Experimenten von Fehr und Gächter, kann ein Knoten, der nicht kooperiert, aber nicht direkt bestraft werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Interaktion indirekt ist. Ein Kontakt kann nur bestraft werden, indem eine von ihm erhaltene Anfrage nicht be-



arbeitet wird. Alternativ kann die ganze Gruppe bestraft werden, indem keine Anfragen bearbeitet werden. Die Experimente von Fehr und Gächter können damit nicht genutzt werden, um zu beobachten, in welcher Form Bestrafung in strukturierten Peer-to-Peer Systemen auftritt. Dies ist insbesondere dann nicht möglich, wenn ein Knoten einen weiter entfernten Knoten bestrafen möchte.

**Öffentliches Gut Spiel zwischen Partnern und Fremden:** Eine andere Eigenschaft, welche Kooperation erhöht, ist direkte Interaktion zwischen den Teilnehmern. In diesem Fall, dem so genannten Partnerentwurf, interagieren dieselben Teilnehmer wiederholt. Das Gegenteil dazu bildet der Fremdenentwurf [KeW00]. Da Menschen in kleinen Gruppen (wie in Familien oder unter Freunden) zu Kooperation tendieren, aber in großen Gruppen eher defektieren, kann in beiden Szenarien unterschiedliches Verhalten erwartet werden.

Keser und van Winden [KeW00] untersuchen entsprechendes Verhalten in öffentlichen Gut Experimenten. Sie beobachten deutliche Unterschiede zwischen Interaktionen von Partnern und Interaktionen von Fremden. Die durchgeführten Experimente sind ähnlich den Experimenten zur Bestrafung (siehe oben). Auch Keser und van Winden führten zwei unterschiedliche Untersuchungen durch: Die Untersuchung des Verhaltens von Fremden entsprach dem Experiment von Fehr und Gächter ohne Bestrafung. In der Untersuchung des Verhaltens von Partnern waren die Gruppen über alle Runden hinweg gleich. Am Ende jeder Runde wurde jeder Teilnehmer über die gesamte Investition der Gruppe in der letzten Runde informiert. Die Experimente zeigen, dass die Auszahlung in der Untersuchung mit Partnern signifikant höher ist, als in der Untersuchung mit Fremden. Interagieren also Menschen direkt mit anderen Menschen, die sie gut kennen, so tendieren sie dazu sich kooperativer zu verhalten, als wenn sie mit Fremden interagieren.

Wie oben erwähnt, entsprechen Interaktionen in strukturierten Peer-to-Peer Systemen nicht Interaktionen zwischen Partnern. Die meiste Zeit bearbeitet ein Knoten Anfragen für andere Knoten, die er nicht kennt. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Partnerentwurf: Nicht der Partner profitiert von der Bearbeitung einer Anfrage, sondern ein anderer Knoten innerhalb des Systems. Dennoch interagiert ein Knoten immer mit denselben Kontakten. Knoten bearbeiten Anfragen mittels indirekter Interaktion, während sie in einer bestimmten Struktur, z.B. einem Gitter in inhaltsadressierbaren Netzen, organisiert sind. Im Folgenden werden Interaktionen über eine vorgegebene Struktur als Indirekte Partner Interaktion bezeichnet. Genauer hat indirekte Partner Interaktion zwei charakteristische Eigenschaften:

- Die Teilnehmer stellen für einen Fremden Dienste zur Verfügung (d.h. sie beantworten Anfragen oder leiten diese weiter).
- Direkte Interaktion tritt immer nur zwischen Partnern auf (indem beispielsweise Nachrichten von Partner zu Partner weitergeleitet werden).

Zusammenfassend unterscheiden sich strukturierte Peer-to-Peer Systeme sowohl von Systemen aus Partnern als auch aus Fremden. Mechanismen zur Motivation von kooperativem Verhalten für dieses Szenario lassen sich nicht einfach von existierenden Modellen ableiten.

**Hilfsspiel:** Reziprozität führt zu kooperativem Verhalten. In einem System von Partnern, kann ein Teilnehmer kooperatives Verhalten eines Interaktionspartners belohnen, indem er in Zukunft kooperiert. Derartiges Verhalten wird als direkte Reziprozität [Tri71] bezeichnet. Interagieren Teilnehmer nicht wiederholt miteinander, so tritt nur indirekte Reziprozität [NoS98] auf. Bei indi-

rekter Reziprozität verhält sich ein Teilnehmer gemäß der Informationen, die er über das Ergebnis vergangener Interaktionen seines Gegenübers besitzt.

In der Literatur bezüglich Interaktionen im Internet, herrscht Konsens, dass hier nur indirekte Reziprozität auftritt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass Feedback Kooperation signifikant erhöht (siehe z.B. [BKO04]).

Seinen und Schramm [SeS01] untersuchen den Effekt von Feedback auf die Kooperativität der Teilnehmer mit dem Hilfsspiel. In diesem Spiel tritt eine Population von Spielern auf, die einander helfen können oder nicht. In jeder Runde des Spiels werden zwei Spieler zufällig einander zugeordnet. Dabei wird sichergestellt, dass die zwei selben Spieler nicht wiederholt aufeinander treffen. Der eine der beiden Spieler hat die Möglichkeit zu spenden, der andere Spieler empfängt das gespendete. Die Kosten für das Spenden sind dabei geringer als der Nutzen durch den Empfang des gespendeten. Spendet der Spieler nicht, so bleibt der Nutzen beider Spieler unverändert. Tab. 6 zeigt die entsprechende Auszahlungsmatrix. Da der Spender in der Zukunft nicht mit dem Empfänger der Spende interagieren wird und die Kosten für das Spenden höher sind als für das Defektieren, wäre es rational für ihn, nicht zu spenden. Entgegen dieser theoretischen Vorhersage zeigen Experimente mit menschlichen Teilnehmern jedoch, dass die Teilnehmer Geld spenden und Empfänger von Spenden sich in Folgerunden ebenso verhalten. Allerdings sind die gespendeten Beträge weit geringer als in dem Fall, wenn die Teilnehmer wiederholt mit demselben gegenüber interagieren. In diesem Fall zeigen alle Teilnehmer kooperatives Verhalten [EnF02].

	<i>Spender</i>	
	<i>Geben</i>	<i>Nehmen</i>
<i>Empfänger</i>	<i>b / -c</i>	<i>0 / 0</i>

**Tab. 6: Auszahlungsmatrix des Hilfsspiels**

Um den Einfluss von Feedback auf das Verhalten der Teilnehmer zu analysieren, wurde das Hilfsspiel um einen Mechanismus erweitert, der es den Spielern erlaubt eine Reputation aufzubauen [SeS01]. In dieser Variante des Spiels besitzt jeder Spieler einen globalen Reputationswert. Dieser Wert steigt immer dann, wenn ein Spieler spendet und er sinkt, wenn der Spieler dies nicht tut. Alle Spieler im System können diesen Wert sehen. Somit kann sich jeder Spieler auf der Basis der letzten Interaktionen des Gegenübers ein Bild von dessen Vertrauenswürdigkeit machen. Aus theoretischer Sicht sollten auch bei diesem Spiel keine Spenden auftreten. Die Argumentation hierfür ist analog der Argumentation für das Hilfsspiel ohne Reputation. Experimente mit menschlichen Teilnehmern zeigen jedoch, dass die mittlere Auszahlung in dem Spiel mit Reputation höher ist als in dem Spiel ohne Reputation [SeS01, EnF02].

**Verhalten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen:** Ausgehend von den oben beschriebenen Experimenten werden nun Hypothesen für das Verhalten von Teilnehmern in strukturierten Peer-to-Peer Systemen abgeleitet.

Gemäß den Experimenten von Fehr und Gächter bestrafen Teilnehmer andere Teilnehmer, wenn sich diese unkooperativ verhalten haben. Sie tun dies selbst dann, wenn das Bestrafen für sie mit Kosten verbunden ist. Da Bestrafung in strukturierten Peer-to-Peer Systemen nicht teuer ist – jeder Teilnehmer kann Anfragen anderer Teilnehmer ohne zusätzliche Kosten falllassen – wird im Folgenden davon ausgegangen, dass auch Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen andere bestrafen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Teilnehmer für die Bestrafung die ihnen zugänglichen Informationen nutzen, wenn sie über Bestrafun-

gen entscheiden: Ist nur Feedback verfügbar, so wird erwartet, dass Teilnehmer auf der Basis von Feedback bestrafen. Besitzen Teilnehmer nur eigene Beobachtungen, so wird erwartet, dass sie auf der Basis dieser Beobachtungen ihre Entscheidungen treffen. Von dieser Erwartung leiten sich die folgenden beiden Hypothesen ab:

*Hypothese Indirekte Bestrafung:* Teilnehmer bestrafen abhängig von den ihnen zur Verfügung stehenden Informationen.

- a) Ist nur Feedback verfügbar, nutzen sie Feedback.
- b) Ist kein Feedback verfügbar, wird auf Basis der eigenen Beobachtungen der Nachbarn bestraft.

Die folgenden beiden Hypothesen beziehen sich auf die Modelle bezüglich Partner und Fremden und bezüglich Feedbacks. Es ist unklar, ob das Verhalten in Szenarien mit indirekter Partner Interaktion vergleichbar ist zum Verhalten von Teilnehmern im Partnerentwurf oder Fremdenentwurf. Damit können zwei Arten von Mechanismen auf das System angewandt werden, die beide die Kooperation der Teilnehmer untereinander erhöhen. Ist das Verhalten vergleichbar zu dem Verhalten im Partnerentwurf, würden Teilnehmer andere Teilnehmer auf der Basis ihrer eigenen Beobachtungen bestrafen. Im anderen Fall, würden die Teilnehmer auf Feedback vertrauen. Beide Alternativen, sowie die Kombination aus Benutzung eigener Beobachtungen und von Feedback können auftreten.

Bolten et al. [BKO02] untersuchen den Einfluss unterschiedlicher Mechanismen zur Stimulation von Kooperation. Sie vergleichen Szenarien bestehend aus Fremden und Szenarien bestehend auf Partner miteinander und analysieren den Einfluss von Feedback in einfachen Systemen ohne Struktur. Die Autoren zeigen, dass Feedback Kooperation erhöht, verglichen mit Systemen in welchen nur Fremde interagieren. Dennoch steigt der Grad an Kooperativität in Systemen bestehend aus Partnern noch weiter. Daher wird im Folgenden erwartet, dass die Eigenschaften des Partner Szenarios einflussreicher sind als Feedback. Daraus resultieren die folgenden Hypothesen:

*Hypothese Strategien ohne Feedback:* In strukturierten Peer-to-Peer Systemen, d.h. in Systemen in welchen eine Interaktionsstruktur gegeben ist, und somit Indirekte Partner Interaktion auftritt, nutzen die Teilnehmer Strategien ohne Feedback.

*Hypothese Kein Einfluss von Feedback auf Auszahlung:* Ein Feedbackmechanismus in strukturierten Peer-to-Peer Systemen erhöht die Auszahlung der Teilnehmer nicht.

Eine Analyse dieser Hypothese ist bedeutend: Können beide Hypothesen bestätigt werden, so kann daraus geschlossen werden, dass die Implementierung eines Feedbackmechanismus in strukturierten Peer-to-Peer Systemen nicht notwendig ist – die Teilnehmer zeigen bereits auf Basis der Beobachtung ihrer Nachbarn einen hohen Grad an Kooperativität.

### **3.1.4 Heterogenität und Effizienz**

Ob in einem System Effizienz erreicht wird, hängt von verschiedenen Entwurfsentscheidungen ab. In diesem Abschnitt werden Modelle aus der Literatur diskutiert, die helfen Effizienz sicherzustellen. Von diesen Modellen werden Vorhersagen bezüglich der Effizienz von strukturierten Peer-to-Peer Systemen gewonnen. Schließlich wird auf Basis dieser Ergebnisse untersucht,

welchen Vorteil eigene Beobachtungen und Schwellwertstrategien in strukturierten Peer-to-Peer Systemen gegenüber anderen Mechanismen besitzen.

**Fairness:** In einem ersten Schritt wird im Folgenden wieder auf das Hilfsspiel aus Abschnitt 3.1.3 eingegangen. In diesem Spiel hat ein Spieler die Rolle des Spenders und ein Spieler die Rolle des Empfängers. Entscheidet sich der Spender gegen eine Spende, so ist die Auszahlung beider Spieler gleich null. Spendet der Spender, so erhält der Empfänger eine Auszahlung größer dem gespendeten Betrag. Wie in Abschnitt 3.1.3 erläutert, sagt die Spieltheorie voraus, dass kein Spieler etwas spenden wird. Verhaltensökonomische Experimente zeigen jedoch, dass rund 22% der Teilnehmer etwas geben [SeS01]. Die Ursache für dieses Verhalten ist Fairness [FeS99]: Teilnehmer besitzen Ungleichheitsaversion. D.h. sie bevorzugen Spielsituationen, in welchen alle Teilnehmer dieselbe Auszahlung bekommen gegenüber Spielsituationen, in welchen ein Teilnehmer deutlich mehr als alle anderen verdient. Fehr und Schmidt [FeS99] zeigen, dass dieses Vorgehen in heterogenen Systemen zu einer Reduktion der Effizienz führt. Ist beispielsweise ein Teilnehmer bereits zu Beginn eines Experiments „reich“, so führt Ungleichheitsaversion zu einer Reduktion der Kooperation mit diesem Teilnehmer auf Grund von Fairnessüberlegungen: Der Spender im Hilfsspiel würde beispielsweise einem Empfänger, von dem er wüsste, dass dieser bereits reich ist, kein Geld geben. Teilnehmer favorisieren folglich Allokationen, in welchen alle Teilnehmer die gleiche Auszahlung besitzen und wählen ihre Aktionen entsprechend. Dadurch sinkt die Effizienz eines Systems: Im erwähnten Hilfsspiel ist der maximale Grad an Effizienz erreicht, wenn alle Teilnehmer spenden, da der Wert der Spende für den Empfänger höher ist als für den Spendenden. Spenden einzelne Teilnehmer auf Grund von Fairnessüberlegungen nicht, so geht ein Teil der Effizienz verloren.

In strukturierten Peer-to-Peer Systemen ist die Situation ähnlich. Hier leiten die Teilnehmer Anfragen freiwillig für andere Teilnehmer weiter. Ist ihr Verhalten von Ungleichheitsaversion, also von Fairness, geprägt, so könnten sie gleiche Auszahlungen für alle Knoten sicherstellen, indem sie für andere Knoten, von welchen sie wissen, dass diese deutlich mehr verdienen als sie selbst, nur einen Teil der Anfragen weiterleiten.

*Beispiel:* Sei einem Knoten A bekannt, dass sein Kontakt B die fünffache Auszahlung für jedes erhaltene Anfrageergebnis erhält wie A selbst. So kann A die gleiche Auszahlung für alle erreichen, indem er nur jede fünfte der Anfragen von B weiterleitet. ■

**Wettbewerb:** Als Maßnahme um Effizienz sicherzustellen, selbst wenn die Teilnehmer in einem System unterschiedliche Auszahlungen besitzen, wird Wettbewerb vorgeschlagen [Smi82]. In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen, in welchen Situationen in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Kooperation auftritt, anschließend wird begründet, warum Wettbewerb alleine in solchen Systemen Kooperation nicht aufrechterhalten kann.

In Märkten mit Wettbewerb [Smi82] kann jeder Spieler jedem anderen Spieler ein Gut zur Verfügung stellen und zu jedem Zeitpunkt ein Gut erwerben. Die Auszahlungen der Spieler können sich dabei signifikant unterscheiden: Hier stellt Wettbewerb Effizienz sicher.

In strukturierten Peer-to-Peer Systemen, verwalten unterschiedliche Teilnehmer unterschiedliche Güter (in Form von Information). Güter existieren nur im Fall von Replikation doppelt (ein Aspekt, der im Folgenden nicht berücksichtigt wird). Austausch tritt jetzt über die Zeit auf: Normalerweise ist der Zeitpunkt an dem ein Knoten ein Datenobjekt anfragt nicht identisch dem Zeitpunkt, wenn andere Daten bei ihm anfragen.

In Systemen mit Wettbewerb tendiert die Kooperation der Teilnehmer dazu mit der Größe des Netzwerkes abzunehmen: Greiner und Levati [GrL05] beschreiben ein Experiment, in dem unterschiedliche Spieler einen Kreis bilden. Nachrichten werden dann innerhalb dieses Kreises verschickt (vergleichbar mit einem ein-dimensionalen inhaltsadressierbaren Netz). In dem Experiment zeigen die Teilnehmer ausschließlich konditionelle Kooperativität, d.h. Teilnehmer A kooperiert in dem Maß mit B, wie der Vorgänger C von A im Kreis mit A kooperiert. Dies führt zu einer Abnahme der Kooperativität mit steigender Netzwerkgröße. Existiert nur ein Freifahrer im System, so kollabiert es: Der Nachbar des Freifahrers kooperiert nicht, dann kooperiert der folgende Nachbar nicht mehr usw. Die Situation ändert sich, sobald Wettbewerb zwischen den Teilnehmern eingeführt wird, wenn einzelne Teilnehmer ihre Anfragen also auf unterschiedlichen Wegen weiterleiten können. Dabei können die Teilnehmer Schwellwertstrategien nutzen. Diese Strategien funktionieren unabhängig von der Größe des Netzwerks und auch in der Gegenwart von Freifahrern: Zum Einen fühlt ein Teilnehmer auf einem langen Routing-Pfad Wettbewerb, da die Teilnehmer ihre Anfragen auch über andere Teilnehmer weiterleiten können. Zum Anderen entscheidet jeder Knoten für welchen anderen Knoten er Anfragen weiterleitet. Ist ein Knoten in den Augen der anderen nicht vertrauenswürdig, leiten diese für ihn keine Anfragen mehr weiter. Damit sollte jeder Knoten mindestens genauso kooperativ wie ein durchschnittlicher Knoten sein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Schwellwert vom mittleren Verhalten der Knoten abhängt. Somit tritt Wettbewerb zwar in strukturierten Peer-to-Peer Systemen auf, nicht aber in unstrukturierten.

Strukturierte Peer-to-Peer Systeme sind effizient – solange die Teilnehmer die gleiche Nutzenstruktur besitzen. Dies ist auf die in Abschnitt 3.3.2 eingeführte Indirekte Partner Interaktion zurückzuführen: Obwohl die Knoten Nachrichten für andere weiterleiten und beantworten, interagieren sie nur mit einer kleinen Gruppe anderer Knoten, die sich über die Zeit kaum ändert: ihren Kontakten. Auf Grund wiederholter Interaktionen mit diesen Knoten, kann ein Knoten den Grad der Kooperativität seiner Kontakte zuverlässig einschätzen. Dies führt dann zu einem hohen Grad an Kooperativität. Während die vorangegangenen Abschnitte ein klares Indiz für den Einfluss von Wettbewerb auf die Kooperativität in strukturierten Peer-to-Peer Systemen sind, ist unklar, ob Wettbewerb auch ausreicht, den negativen Einfluss von Fairness auf die Effizienz auszugleichen.

Dennoch kann gehofft werden, dass Wettbewerb sowohl in heterogenen als auch in homogenen Systemen zu Effizienz führt. Das führt zu der Annahme, dass auch strukturierte Peer-to-Peer Systeme mit heterogenen Teilnehmern effizient sind.

**Verhalten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen:** Dieser Abschnitt untersucht den Einfluss von Heterogenität auf die Effizienz strukturierter Peer-to-Peer Systeme. Während Fairnessüberlegungen der Teilnehmer in diesen Systemen zu Ineffizienz führen können, kann der im System vorhandene Wettbewerb der Knoten untereinander helfen, Effizienz sicher zu stellen. Das Motiv ‚Kooperation‘ bringt Knoten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen dazu, sich im System einzubringen. Wettbewerb auf der anderen Seite könnte ein Motiv sein, das Teilnehmer dazu bringt heterogene Ergebnisse zu akzeptieren. Anders betrachtet, während ein einzelner Knoten ersetzt werden kann, ist eine Reihe von kooperativen Knoten notwendig, um eine Anfrage zu bearbeiten. Folglich ist eine umfassende Analyse strukturierter Peer-to-Peer Systeme mit heterogenen Teilnehmern erstrebenswert.

Fairness führt dazu, dass Teilnehmer, die ‚weniger verdienen‘ als Andere, dazu neigen die Auszahlung der ‚besser verdienenden‘ Teilnehmer zu reduzieren. Jeder Teilnehmer eines Peer-to-Peer Systems, der einen Kontakt besitzt, welcher fünfmal so viel verdient wie alle anderen Teil-

nehmer, kann gleiche Auszahlungen aller Teilnehmer sicherstellen, indem er nur jede fünfte Anfrage dieses Teilnehmers weiterleitet. Für strukturierte Peer-to-Peer Systeme gehen wir jedoch davon aus, dass Wettbewerb das stärkere Motiv ist: Wie zuvor erwähnt, hat jeder Knoten ein Interesse daran in den Augen seiner Kontakte als kooperativ zu erscheinen. Löscht ein Teilnehmer mehrere Anfragen eines Anderen, so sinkt seine Reputation. Damit sinkt auch die Wahrscheinlichkeit, dass seine Anfragen bearbeitet werden. Daraus leitet sich die folgende Hypothese ab:

*Hypothese Kein Strategiewechsel:* In heterogenen Systemen ändert sich die Strategie nicht:

- 1.) *Teilnehmer ändern ihre Strategie gegenüber anderen, die mehr verdienen, nicht.*
- 2.) *Selbst wenn der ausgewählte Teilnehmer, d.h. der Teilnehmer der deutlich mehr verdient als alle anderen, allen Teilnehmern bekannt ist, so ändert sich dessen Auszahlung nicht.*

*Hypothese Auszahlung/Effizienz:* Die Auszahlung der normalen Teilnehmer (mit dergleichen Auszahlung) ist dieselbe im homogenen und im heterogenen Fall. Die Einführung von Heterogenität unter den Teilnehmern beeinflusst die Auszahlung der Teilnehmer nicht.

Eine andere Reaktion auf Heterogenität könnte sein, dass Teilnehmer das System verlassen, da sie sich unfair behandelt fühlen. D.h. sie könnten aufhören Anfragen abzusetzen. Wir erwarten solches Verhalten jedoch nicht: Die Teilnahme lohnt sich für den einzelnen Teilnehmer, wenn er seine Situation unabhängig von der Auszahlung der anderen Teilnehmer betrachtet.

*Hypothese Kein Verlassen:* Teilnehmer nehmen mit der gleichen Intensität in heterogenen Systemen teil, mit der sie auch an homogenen Systemen teilnehmen. Sie schicken also in heterogenen Systemen Anfragen mit derselben Frequenz ab wie in homogenen Systemen.

### **3.2 Experimentaufbau**

Während sich die Hypothesen und die von den Experimenten abgeleiteten Erkenntnisse in den unterschiedlichen Experimentreihen stark unterscheiden, ist das Vorgehen bei der Durchführung der Experimente, sowie die Experimentierumgebung für alle Experimentreihen ähnlich. Dies ermöglicht den Vergleich einzelner Experimente über verschiedene Experimentreihen hinweg. Um unnötige Redundanzen im Text zu vermeiden, wird im Folgenden zunächst allgemein die Durchführung verhaltensökonomischer Experimente für strukturierte Peer-to-Peer Systeme beschrieben, der für diese Arbeit entwickelt wurde. Anschließend wird in einem letzten Unterabschnitt darauf eingegangen, welche Experimentaufbauten genutzt werden können, um die einzelnen in Abschnitt 3.1 eingeführten Hypothesen zu validieren.

Zur Untersuchung menschlichen Verhaltens im Rahmen dieser Arbeit wurde eine plattformunabhängige Simulationsumgebung für das inhaltsadressierbare Netz entworfen und mit Java realisiert. Diese Simulationsumgebung erlaubt es menschlichen Teilnehmern die Knoten im System zu kontrollieren. Genauer kann jeder Teilnehmer eines Experiments die Strategie genau eines Knoten kontrollieren. D.h. ein menschlicher Teilnehmer entscheidet, ob der von ihm kontrollierte Knoten Anfragen anderer Knoten beantwortet oder weiterleitet und ob er selbst Anfragen abschickt. Zusätzlich kann ein Teilnehmer entscheiden, welcher seiner Kontakte die abgeschickte Anfrage zur Bearbeitung erhält. In anderen Worten, die Teilnehmer spielen in einem System miteinander. Dabei stellt die Simulationsumgebung sicher, dass die Teilnehmer

ausschließlich über die Struktur des inhaltsadressierbaren Netzes miteinander interagieren. Sie übernimmt die Beobachtung des Verhaltens der anderen Teilnehmer (siehe unten), so dass sich der menschliche Teilnehmer auf die strategischen Entscheidungen konzentrieren kann.

### 3.2.1 Experimententwurf

Die Anzahl der Teilnehmer in den durchgeführten Experimenten basierte auf einer Aussage von Selten [Sel73]. Er postulierte, dass „vier wenige und sechs viele“ Teilnehmer sind. Mit anderen Worten, Teilnehmer in überschaubaren Gruppen mit sechs Teilnehmern verhalten sich gleich wie Teilnehmer in großen Gruppen. Zudem wird bei der Überprüfung von Hypothesen in den folgenden Abschnitten stets darauf eingegangen, warum die Ergebnisse selbst in Anbetracht dieser vergleichsweise geringen Zahl von Teilnehmern stichhaltig sind.

Die Teilnehmer an den Experimenten kontrollierten die Strategie ihres Knotens über Computerterminals. Die Terminals waren dabei von einander getrennt, um Kommunikation der Teilnehmer untereinander zu verhindern. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Knoten nicht nur die Wahl zwischen unveränderbaren Strategien, wie Freifahrerverhalten oder Kooperation hat. Vielmehr kann er für jede einzelne Aktion entscheiden, ob er sie durchführt oder nicht. So kann jeder Knoten für jede Anfrage, die bei ihm eintrifft, entscheiden, ob er sie weiterleitet oder beantwortet. Er kann auch entscheiden, ob er Anfragen abschickt oder nicht.

Alle im Folgenden vorgestellten Experimente basieren auf theoretischen Überlegungen, die sich wiederum auf Nutzenbetrachtungen stützen. Der Nutzen des Teilnehmers, der den Knoten kontrolliert, definiert sich dann auf der Basis seiner Entscheidungen und der Entscheidungen der anderen Teilnehmer im System. So entsprechen Kosten, die im System auftreten, negativem Nutzen, während Erlöse für den Teilnehmer positiven Nutzen bedeuten. Folglich sind Aktionen, die für den Teilnehmer Arbeit bedeuten, wie das Weiterleiten, das Beantworten von Anfragen oder das Abschicken eigener Anfragen, mit negativem Nutzen verbunden, während das Erhalten von Antworten auf Anfragen, die der Teilnehmer selbst abgeschickt hat, für den Teilnehmer positiven Nutzen bedeuten. Um den Teilnehmern an den Experimenten einen Anreiz für das Abschicken von Anfragen zu geben, wird am Ende eines Experiments der Nutzenwert des Teilnehmers für die Teilnahme am Experiment berechnet. Der Teilnehmer wird dann basierend auf dem erwirtschafteten Nutzenwert ausbezahlt. Dieses Vorgehen stimmt mit dem Vorgehen anderer ökonomischer Experimente überein (siehe z.B. [GrL05, SeS01, SeS86]). Die Intuition dahinter ist, dass der Nutzen einer Person mit der Menge an Geld, das er verdient, ansteigt. Dies gilt, obwohl zwischen der Auszahlung und dem erzielten Nutzen nicht notwendig eine lineare Korrelation besteht.

### 3.2.2 Struktur der Experimente

Zu Beginn eines Experiments wurden die Teilnehmer zufällig Plätzen im Labor zugeordnet. Ein Experiment dauerte abhängig vom konkreten Untersuchungsgegenstand 80 bis 120 Minuten. Dabei dienten die ersten 20 Minuten der Orientierung und dem Verständnis der Experimentbeschreibung. Diese wurde in Textform an die Teilnehmer verteilt. Danach spielten die Teilnehmer einige Runden mit der Experimentumgebung, um sich mit ihr vertraut zu machen. Schließlich wurden abhängig von der untersuchten Fragestellung unterschiedliche Spiele gespielt. Im Folgenden werden diese Spiele als *Untersuchung* bezeichnet.

Jede Untersuchung bestand aus mindestens zwanzig Runden. Innerhalb dieser Runden fand keine Diskontierung statt. Danach wurde ein Abzinsfaktor eingeführt. Dieser Abzinsfaktor  $\beta$  in ökonomischen Experimenten entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass das Spiel nach der aktuellen Runde endet. Es ist eine Beobachtung aus anderen verhaltensökonomischen Experimenten, dass die Interpretation von  $\beta$  als Wahrscheinlichkeit für das Weiterspielen oder als Abzinsungsfaktor die Ergebnisse des Experiments nicht beeinflussen [HeV02]. In den hier beschriebenen Experimenten wurde ein Abzinsungsfaktor von 0,1 gewählt. D.h. nach Runde 20 wurde für jede Runde mit einem zehneckigen Würfel gewürfelt. Zeigte dieser Würfel die Zahl 1, so endete das Spiel, andernfalls wurde weitergespielt.

Nach den Untersuchungen wurde ein so genanntes Strategiespiel durchgeführt. Das Konzept des Strategiespiels wurde ursprünglich von Selten eingeführt [Sel67]. Seit der Einführung ist es eine gängige Methode, um Strategien in ökonomischen Experimenten zu beobachten (siehe z.B. [SMU97]). In einem Strategiespiel werden die Teilnehmer gebeten ihre Strategie mit eigenen Worten niederzuschreiben. Strategiespiele werden üblicherweise am Ende von ökonomischen Experimenten durchgeführt, nachdem die Teilnehmer an mehreren Untersuchungen teilgenommen haben. So können Strategien erfahrener Spieler beobachtet werden. Während Teilnehmer im Laufe der Untersuchungen lernen und ihre Strategie immer weiter verfeinern, tendieren sie dazu, im Strategiespiel ein tiefes Verständnis des Experiments zu besitzen. In einem Strategiespiel beschreiben die Teilnehmer die Strategien, die sie während der Untersuchungen genutzt haben. Die Beschreibungen basieren dabei auf der Nutzenstruktur der Strategien. Strategien können von Parametern der Untersuchungen sowie von der Historie einer Untersuchung abhängen. Aus theoretischer Sicht stehen die Teilnehmer im Strategiespiel denselben Aufgaben gegenüber, wie im „realen“ Verlauf der Untersuchungen. Im Strategiespiel werden alle möglichen Entscheidungssituationen der Spieler berücksichtigt, während die Teilnehmer im „realen“ Verlauf nur mit einer eingeschränkten Teilmenge dieser Entscheidungssituationen konfrontiert werden. Das Strategiespiel ermöglicht es damit, eine aus spieltheoretischer Sicht vollständige Strategie zu beobachten. Dies ist bei der Betrachtung einzelner Untersuchungen normalerweise nicht möglich.

Am Ende jedes Experiments wurden die Teilnehmer basierend auf ihrem Erfolg während der Untersuchungen bezahlt.

### **3.2.3 Realisierung der Untersuchungen**

Zu Beginn jeder Untersuchung wurden von der Simulationsumgebung zufällig (Schlüssel; Wert)-Paare in das System eingefügt. Die (Schlüssel; Wert)-Paare wurden gleichmäßig auf alle Teilnehmer im System verteilt. D.h. jeder Knoten im System kannte genau gleich viele solche Paare. Die Verwaltung der (Schlüssel; Wert)-Paare wurde vom System übernommen. Somit musste sich keiner der Teilnehmer die von seinem Knoten kontrollierten Paare selbst merken. In jeder Runde konnte jeder Teilnehmer eine Anfrage absetzen. D.h. jeder Teilnehmer konnte nach einem Wert für einen Schlüssel fragen. Dabei gab die Simulationsumgebung den Schlüssel vor. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da erste Testexperimente zeigten, dass menschliche Teilnehmer Schwierigkeiten hatten diese Aufgabe selbst zu übernehmen. Dieses Vorgehen sollte das Verhalten von Knoten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen widerspiegeln: Hier fragen die Teilnehmer kontinuierlich nach Anfrageergebnissen. Für jede eingehende Anfrage musste der Teilnehmer entscheiden, ob er sie bearbeitet, also beantwortet bzw. weiterleitet, oder nicht. Wenn er sich für die Bearbeitung entschloss, wurde ihm mitgeteilt, ob er die Anfrage selbst beantworten oder ob er sie weiterleiten kann. D.h. die Simulationsumgebung teilte ihm mit, ob das gesuchte (Schlüssel; Wert)-Paar von ihm verwaltet wurde oder nicht. Musste die



Anfrage weitergeleitet werden, so konnte sich der Empfänger der Anfrage zwischen denselben Aktionen entscheiden. Beim Absenden eigener Anfragen und beim Weiterleiten zeigte die Simulationsumgebung dem Teilnehmer die potenziellen Adressaten für die Anfrage. Die Adressaten waren Kontakte des aktuellen Knotens. Die potenziellen Adressaten wurden dem Teilnehmer nach ihrem euklidischen Abstand zum Anfragepunkt sortiert gezeigt. Der Teilnehmer konnte einen dieser Kontakte als Ziel für die Anfrage auswählen. Die Anfrage wurde dann von der Simulationsumgebung an den ausgewählten Teilnehmer weitergeleitet. Die Wahl des nächsten Adressaten wurde vom Teilnehmer und nicht von der Simulationsumgebung übernommen, da dies eine strategische Entscheidung ist: Die Wahl des nächsten Adressaten kann nicht nur von der Wahrscheinlichkeit abhängen, dass der gewählte Adressat die gesuchte Antwort besitzt, sondern auch auf den Beobachtungen des Verhaltens dieses Teilnehmers in der Vergangenheit. Ziel der Experimente war es unter anderem, die Teilnehmer hierfür zu entsprechenden Strategien zu zwingen und diese dann in unterschiedlichen Untersuchungen zu beobachten.

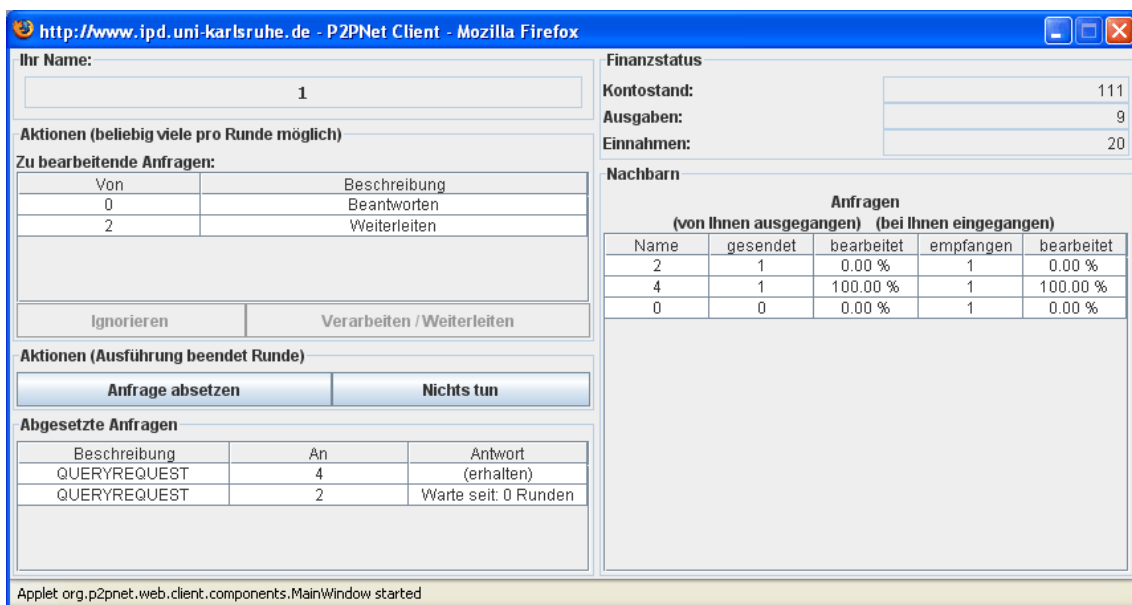
<i>Aktion</i>	<i>Punktänderung</i>
<i>Beantworten von Anfragen</i>	-5
<i>Abschicken von Anfragen</i>	-2
<i>Weiterleiten von Anfragen</i>	-1
<i>Erhalten von Anfrageergebnissen</i>	20

**Tab. 7: Punktänderungen abhängig von der gewählten Aktion**

Jeder Teilnehmer erhielt zu Beginn des Experiments 100 Punkte. Das Beantworten einer Anfrage kostete 5 Punkte, Abschicken von Anfragen 2 Punkte und Weiterleiten 1 Punkt. Jeder Teilnehmer erhielt 20 Punkte für das Erhalten eines von ihm angefragten (Schlüssel, Wert)-Paares. Diese Werte bilden die Kosten in einem strukturierten Peer-to-Peer System ab: Das Weiterleiten und Abschicken von Anfragen ist relativ günstig, da hier nur Nachrichten verschickt werden. Beantworten besteht aus dem Senden einer Nachricht und dem Suchen nach den entsprechenden Informationen. Während der genaue Nutzen einer einzelnen Anfrage sicherlich von der Anwendungsdomäne abhängt, ist er in den meisten Fällen verglichen zu den Kosten der Anfragebearbeitung hoch. In Szenarien, in welchen die Auszahlung für das Erhalten von Anfrageergebnissen gering im Vergleich zu den Kosten ist, ist die Teilnahme am System nicht lohnend. Dies ist für die Teilnehmer offensichtlich, entsprechende Untersuchungen damit nicht interessant. Eine Übersicht über die Punktänderungen bietet Tab. 7.

In Abb. 15 ist ein Bildschirmfoto der Benutzeroberfläche der Experimentumgebung zu sehen. Das Bildschirmfoto visualisiert die Informationen, die einem Teilnehmer mit der Identifikationsnummer 1 gezeigt wurden. Dieser Teilnehmer hatte in der Vergangenheit eine Anfrage an Spieler 2 und eine Anfrage an Spieler 4 geschickt. Die Informationen im unteren, linken Bereich des Bildschirmfotos zeigen dies. Die Anfrage, die an Spieler 4 geschickt wurde, ist bereits beantwortet worden. Die Antwort kommt dabei nicht notwendigerweise von Spieler 4. Sie kann auch von einem Spieler kommen, an den Spieler 4 die Anfrage weitergeleitet hat. Dies wird durch den Wert „erhalten“ in der Spalte „Antwort“ indiziert. Die an Spieler 2 geschickte Anfrage wurde noch nicht beantwortet. Der Wert „Warte seit: 0 Runden“ in der Spalte „Antwort“ gibt zusätzlich die Information, dass der Teilnehmer die Anfrage erst in der letzten Runde abgeschickt hat. Spieler 1 hat eine Anfrage von Spieler 0, die er selbst beantworten kann, und eine Anfrage von Spieler 2, die er nur weiterleiten kann, erhalten. Diese Information steht im oberen, linken Bereich des Bildschirmfotos. Der untere, rechte Bereich enthält eine Zusammenfassung der Informationen über alle Kontakte von Spieler 1. In diesem Bereich ist zu erkennen, dass Spieler 1 eine Anfrage an Spieler 2 und eine an Spieler 4 geschickt hat. (Dies entspricht den Informatio-

nen, die auch im linken, unteren Bereich zu sehen sind.) Der Anteil der von Spieler 1 an Spieler 4 geschickten Anfragen in der Spalte „bearbeitet“ ist „100,00 %“. Dies zeigt, dass Spieler 1 diese Anfrage bereits beantwortet hat. Entsprechend zeigt der Wert „0,00 %“ in der Zeile von Spieler 2, dass die an Spieler 2 geschickte Anfrage noch nicht beantwortet wurde. Analog sind die Werte in den hinteren beiden Spalten dieser Tabelle zu lesen. Spieler 1 hat Anfragen von den Spielern 0, 2 und 4 erhalten. Nur die Anfrage von Spieler 4 wurde bisher bearbeitet. Die noch nicht beantworteten Anfragen sind im linken, oberen Bereich des Bildschirmfotos zu sehen. Der Wert „Kontostand“ im oberen, rechten Bereich ist der aktuelle Punktestand des Spielers. Darunter finden sich die Punkte, die für das Weiterleiten, Beantworten und Abschicken von Anfragen investiert wurden, sowie eine Summe über alle Punkte, die der Teilnehmer bisher „verdient“ hat.



**Abb. 15: Bildschirmfoto der Benutzeroberfläche der Experimentumgebung**

Am Ende jeder Runde wurden die Teilnehmer über ihren Punktestand in den letzten Runden informiert. Zudem wurde ihnen mitgeteilt, welches Ergebnis das Werfen des Würfels brachte (ob das Spiel weiterlief oder endete). Die Eigenschaften anderer Teilnehmer, wie deren Punktestand und deren gewählte Aktionen, wurden geheim gehalten. Zudem wurde sichergestellt, dass keiner der Teilnehmer herausfinden konnte, welche Identität die anderen Teilnehmer besaßen. Neben den Informationen auf der Benutzeroberfläche der Experimentumgebung wurden den Teilnehmern keine Informationen gegeben.

Zusammenfassend hatte jeder Teilnehmer mehrere Aktionsmöglichkeiten, während der Untersuchungen. Er konnte Anfragen abschicken oder nicht. Er konnte eingehende Anfragen weiterleiten bzw. beantworten oder nicht. Beim Weiterleiten und Abschicken von Anfragen, konnte er den Adressaten auswählen.

### 3.2.4 Experimentreihen

Um die in Abschnitt 3.1 eingeführten Hypothesen zu validieren, sind drei unterschiedliche Experimentreihen nötig, die jeweils auf die Rahmenbedingungen der Experimente eingehen. In einer ersten Experimente Reihe (Experimentreihe Eigene Beobachtungen) wird zunächst auf Systeme-

me eingegangen, in welchen alle Teilnehmer gleich sind und kein Feedback nutzen. Mit dieser Experimentreihe können die Hypothesen aus Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.2 untersucht werden. In einer zweiten Experimentreihe (Experimentreihe Feedback) wird den Teilnehmern dann ermöglicht Feedback auszutauschen, um die Hypothesen aus Abschnitt 3.1.3 zu validieren. Schließlich wird eine dritte Experimentreihe (Experimentreihe Heterogenität) genutzt um auf den Einfluss heterogener Nutzenfunktionen einzugehen. Mit dieser Experimentreihe werden die Hypothesen aus Abschnitt 3.1.4 überprüft.

Die an die Teilnehmer ausgegebenen Instruktionen für die Teilnahme an den Experimentreihen finden sich in Anhang A.1.

**Experimentreihe Eigene Beobachtung:** Um die in Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.2 eingeführten Hypothesen zu überprüfen, wurden zwei unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt. In *Untersuchung Standard* wurde das Verhalten von menschlichen Teilnehmern in strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit sechs Teilnehmern untersucht. Diese Teilnehmer konnten kein Feedback austauschen und erhielten alle die Punkte, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. In *Untersuchung Mit Freifahrer*, einer Modifikation von *Untersuchung Standard*, wurde ein Freifahrer eingeführt, der mit den übrigen fünf Teilnehmern interagierte.

Die *Untersuchungen Standard* und *Kein Freifahrer* konnten zum Belegen bzw. Widerlegen aller in den Abschnitten in Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Hypothesen genutzt werden. In den dort vorgestellten Hypothesen wurden Annahmen bezüglich des Verhaltens der Teilnehmer unabhängig von der Auszahlung und ohne den Einsatz von Feedback beschrieben.

Jedes Experiment, bestehend aus den zwei Untersuchungen, wurde mit zehn unterschiedlichen Gruppen von Teilnehmern wiederholt. Dabei erhielt jeder Teilnehmer € 2,00 für 100 Punkte, die er mit seiner Strategie verdiente. Die mittlere Auszahlung pro Teilnehmer war € 11,05.

**Experimentreihe Feedback:** Zur Überprüfung der in Abschnitt 3.1.3 eingeführten Hypothesen wurde eine weitere Experimentreihe durchgeführt. Es wurden zwei Untersuchungen durchgeführt. Eine *Untersuchung Vertrauen* und eine *Untersuchung Feedback*. Bei der *Untersuchung Vertrauen* kannte jeder Teilnehmer nur den Anteil seiner Anfragen, die beantwortet worden waren. D.h. die Experimentumgebung zeigte ihm einen Wert  $\alpha$ , mit

$$\alpha = \frac{\text{Anzahl Anfrageergebnisse empfangen}}{\text{Anzahl Anfragen verschickt}}$$

Während ein Teilnehmer somit wusste, welcher Anteil seiner Anfragen beantwortet worden war, zeigte die Experimentumgebung keine Informationen an, wenn er Anfragen konkret geschickt oder weitergeleitet hatte. Der Anteil  $\alpha$  bezog sich auf alle Anfragen, die der Teilnehmer im System gestellt hatte. Es gab also nur einen Wert  $\alpha$  nicht unterschiedliche Werte für jeden Kontakt, wie in der Experimentreihe Eigene Beobachtungen. Auch wenn dieser Aufbau in gewisser Weise künstlich ist, so war er notwendig, um den Effekt von Feedback unabhängig von eigenen Beobachtungen zu untersuchen. Die zweite Untersuchung, der *Untersuchung Feedback*, ähnelte der *Untersuchung Vertrauen*, mit der Ausnahme, dass ein Teilnehmer jeder Anfrage, die er verschickte, weiterleitete oder beantwortete ein Feedbackobjekt anhängen musste. Der Teilnehmer legte fest, auf welchen anderen Peer sich das Feedback bezog und entschied, ob das Feedbackobjekt positiv oder negativ war. Jedem Teilnehmer wurde für jeden Kontakt ein Aggregat aller Feedbackobjekte, die er verschickt hatte und die er empfangen hatte, gezeigt.

An jeder Untersuchung nahm ein unkooperativer Spieler teil. Er schickte, wie der Freifahrer in der vorangegangenen Experimentreihe, ausschließlich Anfragen ab und beantwortete bzw.

leitete keine eingehenden Anfragen für andere weiter. Die Intuition hinter der Einführung eines Freifahrers ist hier gleich der Intuition in der vorangegangenen Experimentreihe: Sanktionsmechanismen lassen sich in einem System nur untersuchen, wenn auch sanktionswürdiges Verhalten auftritt.

Jedes Experiment wurde mit zwölf Gruppen durchgeführt. Um Reihenfolgeeffekte auszuschließen, wurde die Reihenfolge in welcher die zwei Untersuchungen gespielt wurden von Gruppe zu Gruppe ausgetauscht.

Am Ende des Experiments wurden die Teilnehmer abhängig von ihrem Erfolg bezahlt. 100 Punkte in den Untersuchungen entsprachen einer Auszahlung von € 2,00. Die mittlere Auszahlung der Teilnehmer betrug € 13,18.

**Experimentreihe Heterogenität:** Um die in Abschnitt 3.1.4 eingeführten Hypothesen zu prüfen, wurden in dieser Experimentreihe drei Untersuchungen durchgeführt: Die erste Untersuchung war identisch zur *Untersuchung Standard* in der Experimentreihe Eigene Beobachtungen. Die Auszahlungen der Teilnehmer waren also homogen. In der zweiten Untersuchung wurde einer der Teilnehmer, der so genannte ausgewählte Teilnehmer, zufällig ausgelost. Für jede erhaltene Anfrageantwort bekam er die fünffache Punktzahl der anderen Teilnehmer gutgeschrieben (*Untersuchung ohne Information*). Den Teilnehmern war dabei nicht bekannt, welcher andere Teilnehmer der ausgewählte Teilnehmer ist (wenngleich sie wussten, dass ein solcher Teilnehmer existiert). Die dritte Untersuchung entsprach der Untersuchung ohne Information, mit dem Unterschied, dass jeder Teilnehmer die Identität des ausgewählten Teilnehmers kannte (*Untersuchung mit Information*).

Auch bei dieser Experimentreihe wurden die Teilnehmer abhängig von ihrem Erfolg bezahlt. Die Auszahlung der Teilnehmer entsprach den erwirtschafteten Punkten (€ 2,00 für 100 Punkte). Im Mittel verdiente dabei jeder Teilnehmer € 18,10.

Tab. 8 fasst die Unterschiede zwischen den Untersuchungen und Experimentreihen zusammen.

Experimentreihe	Eigene Beobachtung		Feedback		Heterogenität		
	Standard	Mit Freifahrer	Vertrauen	Feedback	Standard	Ohne Information	Mit Information
Freifahrer	nein	ja	ja	ja	nein	nein	nein
Feedback	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein
Beobachtung nur global	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein
Ausgew. Knoten	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja
Ausgew. Knoten (bekannt)	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja

**Tab. 8: Übersicht über die Untersuchungen**

### 3.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Experimentreihen beschrieben. Die Ergebnisse der Experimentreihe Eigene Beobachtungen wurden in [SBS06a, SBS06b], die Ergebnisse der Experimentreihe Feedback wurden in [SBV07a] und die Ergebnisse der Experimentreihe Heterogenität wurden in [SBS07b] veröffentlicht.

Die Ausgangsdaten für die hier vorgestellten Ergebnisse finden sich im Anhang (Experimentreihe Eigene Beobachtung: Anhang A.2, Experimentreihe Feedback: Anhang A.3 und Experimentreihe Heterogenität: Anhang A.4).

### 3.3.1 Experimentreihe Eigene Beobachtungen

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der ökonomischen Experimente mit menschlichen Teilnehmern zusammen und stellt den Zusammenhang zu den in Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.2 motivierten Hypothesen her. Die hier beschriebenen Ergebnisse fassen Experimente mit 60 Studenten verschiedener Disziplinen zusammen, die innerhalb von neun Monaten durchgeführt wurden [SBS06a, SBS06b]. Die Experimente wurden im Experimentallabor der Otto-von-Guericke Universität in Magdeburg durchgeführt. Die Teilnehmer der Experimente wurden durch Aushang auf dem Universitätsgelände rekrutiert.

**Hypothese Schwellwertstrategien:** Zur Bestätigung der Hypothese Schwellwertstrategien, d.h. zur Überprüfung, ob Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Schwellwertstrategien nutzen, wurde das Strategiespiel analysiert. Erfahrungen mit anderen ökonomischen Experimenten zeigen [Sel67], dass Spieler dazu tendieren ihre Strategie zu ändern, während sie spielen. Insbesondere am Anfang und am Ende einer Untersuchung weicht die Strategie von der Strategie während des eigentlichen Spiels ab. Es ist dabei schwierig herauszufinden, in welchen Runden diese Effekte genau auftreten. Daher ist die Strategiemethode das Mittel der Wahl beim Validieren der Hypothesen. Ein anderes Argument für die Strategiemethode ist, dass Schwellwertstrategien nur von erfahrenen Spielern gespielt werden. Deshalb sollten Lerneffekte soweit wie möglich verhindert werden. Zudem sollte das Verhalten der Teilnehmer in Bezug auf die Beobachtungen anderer Teilnehmer untersucht werden. Das Verhältnis zu anderen Spielern lässt sich am besten mit der Strategiemethode untersuchen.

Die Auswertung des Strategiespiels zeigte, dass sich die Strategien der Teilnehmer zwischen der Untersuchung Standard und der Untersuchung Mit Freifahrer nicht unterscheiden. Die meisten Strategien bestanden aus einer Startphase und einer Hauptphase. Während der Startphase, die nach einigen Runden endete zeigten die Teilnehmer unterschiedliches Verhalten. Da die Teilnehmer nur an einigen Interaktionen zu Beginn des Spiels teilnahmen, konnte ihr Verhalten in diesen Runden noch nicht von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit abhängen. Die ökonomische Theorie stützt sich auf das Analysieren von Verhalten von Teilnehmern im Gleichgewicht (siehe Abschnitt 2.2). Da sich die Hypothesen auf ökonomische Theorie stützen, wird daher nur die Hauptphase der Spiele untersucht. Tab. 9 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse.

Die beobachteten Strategien lassen sich in drei Klassen unterteilen:

- 1.) Die Aktionen der Teilnehmer stützen sich nur auf die Erfolgswahrscheinlichkeit eigener Anfragen in der Vergangenheit unabhängig vom Absender (mit unterschiedlichen Schwellwerten).
- 2.) Die Aktionen der Teilnehmer hängen von der Erfolgswahrscheinlichkeit eigener Anfragen und anderen Faktoren ab.
- 3.) Die Strategien sind mit der Hypothese Schwellwertstrategien nicht vereinbar.

Drei von sechs Teilnehmer in den Untersuchungen der Experimentreihe Eigene Beobachtungen spielten Strategien, die sich auf die absolute Anzahl unbeantworteter Anfragen bezog und nicht auf deren prozentualen Anteil. Fünf Teilnehmer spielten Strategien, die sich weder auf die Erfolgswahrscheinlichkeit noch auf die absolute Anzahl unbeantworteter Anfragen stützten. Die übrigen 52 Teilnehmer spielten Strategien, die sich auf die Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit stützten. 41 dieser Strategien bestätigen die Hypothese Schwellwertstrategien. Elf Teilnehmer spielten geringfügige Änderungen dieser Strategie. Drei der Teilnehmer versuchten, das Ende des Spiels zu antizipieren. Drei andere versuchten, weniger weiterzuleiten als andere (eine Art von Freifahrerverhalten). Die übrigen fünf Teilnehmer spielten Strategien, die sich von Schwellwertstrategien unterscheiden.

<i>Strategie</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Anzahl Spieler</i>
<i>Schwellwertstrategien ausschließlich abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit</i>	<i>(1)</i>	<i>41</i>
<i>Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit plus Endphase</i>	<i>(2)</i>	<i>3</i>
<i>Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit plus Bedingung weniger Anfragen zu beantworten als beantwortet wurden</i>	<i>(2)</i>	<i>3</i>
<i>Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit für abgeschickte Anfragen, zufälliges Verhalten bei Anfragen anderer</i>	<i>(2)</i>	<i>4</i>
<i>Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit für abgeschickte Anfragen, Antworten von Anfragen für andere, nachdem mehrere unbeantwortete Anfragen eingetroffen sind</i>	<i>(2)</i>	<i>1</i>
<i>Schwellwertstrategien abhängig von der absoluten Anzahl beantworteter Anfragen</i>	<i>(3)</i>	<i>3</i>
<i>Andere Strategien</i>	<i>(3)</i>	<i>5</i>

**Tab. 9: Typen von Strategien im Strategiespiel**

Um zu prüfen, ob die Experimente die Hypothese Schwellwertstrategien bestätigen, wird eine Null-Hypothese eingeführt, die besagt, dass Teilnehmer keine Schwellwertstrategie spielen. Diese Hypothese wird mit Hilfe eines Binomialtests überprüft. 41 (von 60) Schwellwertstrategien widersprechen dieser Null-Hypothese. Damit kann die Null-Hypothese auf einem Signifikanzniveau von 1% widerlegt werden. Dieses Ergebnis bestätigt die Hypothese Schwellwertstrategie.

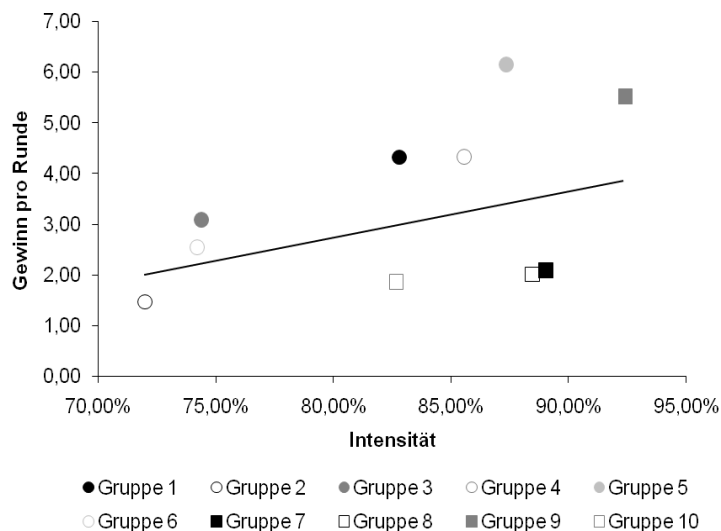
Somit ist gezeigt, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Schwellwertstrategien spielen. Nur sehr wenige Teilnehmer nutzten die Möglichkeit ihren Punktestand zu verbessern, indem sie in den letzten Runden einer Untersuchung nicht kooperierten.

Unbestritten sind sechs Teilnehmer wenige, verglichen mit mehreren Tausend Teilnehmern in realen Peer-to-Peer Systemen. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass sich das Verhalten der Teilnehmer in diesen Experimenten qualitativ nicht von der Anzahl der Teilnehmer beeinflussen lässt: Das Ergebnis des Strategiespiels ist, dass Teilnehmer Schwellwertstrategien spielen, unabhängig von der Größe des Netzes. Auf der anderen Seite könnten größere Systeme weniger stabil sein: In größeren Systemen ist es einfacher den Schwellwert zu überschreiten.

**Hypothese Reziprozität:** Die bis hier beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass Teilnehmer Schwellwertstrategien benutzen. Im Folgenden wird nun untersucht, ob diese Strategien auch personalisiert sind. Dafür werden erneut die Strategien des Strategiespiels herangezogen. Die Anzahl der Strategien, die mindestens in Teilen auf der Identifikation einzelner Peers basieren, werden hierfür zunächst bestimmt. Alle Schwellwert Strategien gehören zu dieser Gruppe. Damit bestätigen 55 Strategien die Hypothese Reziprozität, während 5 andere diese Hypothese nicht bestätigen. Ein Binomialtest bestätigt die Hypothese auf einem Signifikanzniveau von 1%.

**Hypothese Vertrauen:** Im Folgenden sollen die Spiele mit Fokus auf den Grad des Vertrauens im System untersucht werden. Gemäß Hypothese Vertrauen bestimmt die Intensität in einem Spiel das Vertrauen in das System. Die Intensität ist die Anzahl der Anfragen, die ein Teilnehmer tatsächlich abgeschickt hat, geteilt durch die Anzahl der Anfragen, die der Teilnehmer hätte abschicken können.

Die Anzahl der Anfragen, die im System hätten abgeschickt werden können, berechnet sich aus der Anzahl der Runden multipliziert mit der Anzahl der Teilnehmer im System. Der mittlere Gewinn ist die Summe aller Punkte aller Teilnehmer dividiert durch die Anzahl der Teilnehmer und die Anzahl der Runden. Abb. 16 visualisiert die Korrelation zwischen der Intensität und dem mittleren Gewinn für alle Gruppen, gemittelt über alle drei Untersuchungen. Eine lineare Regression zeigt die positive Korrelation zwischen beiden Faktoren. Die Regressionsgerade in Abb. 16 visualisiert dies. Der Anstieg der Geraden, welche die Intensität mit dem mittleren Gewinn ins Verhältnis setzt, ist signifikant verschieden von 0 (auf einem Signifikanzniveau von 1%). Dies bestätigt die Hypothese Vertrauen. Dies zeigt, dass Vertrauen in das System die Effizienz des Systems erhöht.



**Abb. 16: Korrelation zwischen mittlerem Gewinn und Intensität**

Die Betrachtung der Strategien des Strategiespiels ergibt, dass jeder Teilnehmer begann Anfragen abzusenden, ohne Erfahrungen bezüglich des Verhaltens der übrigen Peers zu besitzen. Es zeigt sich auch, dass sich alle Teilnehmer reziprok verhielten und niemand Freifahrerverhalten folgte. Diese beiden Fakten zeigen, dass alle Teilnehmer in einem strukturierten Peer-to-Peer System kooperieren.

Aufgrund dieser Beobachtung musste zur Analyse von Freifahrerverhalten ein Teilnehmer instruiert werden Freifahrerverhalten zu zeigen, also die Untersuchung Mit Freifahrer durchge-

führt werden. Ohne diesen instruierten Teilnehmer, wäre die Analyse zum Effekt von Freifahrerverhalten nicht möglich gewesen.

**Hypothese Freifahrerverhalten ohne Zusammenbruch:** In Untersuchung Mit Freifahrer wurde ein Teilnehmer instruiert sich unkooperativ zu verhalten. Dieser Teilnehmer sollte nur Anfragen stellen und keine eingehenden Anfragen bearbeiten.

Gruppe	Untersuchung Standard		Untersuchung Mit Freifahrer		
	Alle Peers	Unkooperativer Peer in 2. Untersuchung	Alle Peers	Unkooperativer Peer	Andere Peers
1	5,85	7,71	4,11	3,45	4,25
2	2,63	5,90	0,89	1,27	0,82
3	4,40	6,52	1,85	2,35	1,75
4	6,79	10,20	2,81	8,00	1,78
5	7,78	7,36	4,47	3,83	4,59
6	2,31	5,95	0,99	3,67	0,46
7	4,31	-0,50	1,47	2,17	1,33
8	5,30	0,45	0,93	0,50	1,02
9	5,01	7,95	4,61	5,20	4,50
10	2,10	0,09	1,27	3,56	0,81
Mittel	4,65	5,16	2,34	3,40	2,13

**Tab. 10: Mittlere Auszahlung pro Runde**

Um zu untersuchen, ob Freifahrerverhalten eines Teilnehmers zu einem Zusammenbruch des Systems führen kann (Hypothese Freifahrerverhalten ohne Zusammenbruch), werden die Ergebnisse der Untersuchung Standard und der Untersuchung Mit Freifahrer in Tab. 10 verglichen. In allen zehn Gruppen ist die Auszahlung in der Untersuchung Mit Freifahrer geringer als in der Untersuchung Standard. Ein Binomialtest zeigt, dass dieses Ergebnis signifikant ist (auf Signifikanzniveau 1%). Die Effizienz des Systems ist korreliert zu der mittleren Auszahlung pro Runde. Daraus kann geschlossen werden, dass die Effizienz im System sinkt. Die Auszahlung in Untersuchung Mit Freifahrer ist ungefähr halb so hoch, wie in Untersuchung Standard, aber noch immer positiv.

Ist das Ende einer Untersuchung bekannt, könnte ein Peer-to-Peer System zusammenbrechen, gemäß mehrerer Ergebnisse ökonomischer Untersuchungen, siehe z.B. [And88], sowie den Vorhersagen des teilspielperfekten Gleichgewichts. Während der ersten zehn Runden der Untersuchung tendieren Spieler dazu am meisten zu kooperieren. Selbst wenn die Analyse die ersten zehn Runden der Untersuchung nicht betrachtet, werden diese Ergebnisse bestätigt (siehe Tab. 11). Dies bestätigt die Hypothese Freifahrerverhalten ohne Zusammenbruch.

Der Vergleich der Auszahlung des unkooperativen Spielers mit der mittleren Auszahlung der übrigen Spieler in Untersuchung Mit Freifahrer zeigt, dass die Auszahlung des unkooperativen Spielers geringfügig höher ist als die Auszahlung der übrigen Spieler. In acht von zehn Gruppen schneidet er besser ab. Dennoch ist die mittlere Auszahlung des destruktiven Spielers in Untersuchung Mit Freifahrer geringer als die Auszahlung in Untersuchung Standard. In sieben von zehn Gruppen ist die Auszahlung des unkooperativen Spielers in Untersuchung Kein Freifahrer höher. Diese Beobachtung ist essentiell. Sie zeigt, dass sich Freifahrerverhalten nicht lohnt.



Teilnehmer müssen nicht notwendigerweise daran interessiert sein ihre Auszahlung zu maximieren. Es ist denkbar, dass sie nur mehr verdienen wollen als die anderen. Dies ist eine spezielle Form von Wettbewerb. Wir berechnen also die relative Auszahlung der Teilnehmer. Die relative Auszahlung ist der Quotient der eigenen Auszahlung dividiert durch die mittlere Auszahlung der übrigen Teilnehmer. Ist ein Teilnehmer motiviert durch die relative Auszahlung, so ist für ihn Freifahrerverhalten attraktiv, da er mehr als die anderen Teilnehmer verdient. Für Teilnehmer, die aber an der absoluten Höhe der eigenen Auszahlung interessiert sind, lohnt sich Freifahrerverhalten nicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Auszahlung des unkooperativen Teilnehmers geringer ist, wenn er unkooperativ ist als wenn er kooperiert. Für die meisten Szenarien, einschließlich strukturierter Peer-to-Peer Systeme, ist die relative Auszahlung jedoch nur von fiktiver Bedeutung. Die Teilnehmer können die Auszahlung anderer Teilnehmer nicht beobachten. In anderen Worten: Freifahrerverhalten lohnt sich nicht. Während unserer Experimente verhielt sich kein Teilnehmer unkooperativ, außer er wurde dazu aufgefordert. Das Ermöglichen der Beobachtung des Verhaltens der Nachbarn in strukturierten Peer-to-Peer System schützt somit vor Freifahrerverhalten.

Gruppe	Untersuchung Standard		Untersuchung Mit Freifahrer		
	Alle Peers	Unkooperativer Peer in 2. Untersuchung	Alle Peers	Unkooperativer Peer	Andere Peers
1	5,77	8,29	5,07	4,67	5,15
2	3,58	7,80	0,83	0,09	0,97
3	4,61	8,00	0,97	-0,46	1,26
4	7,43	9,73	2,74	5,14	2,26
5	8,40	7,67	4,74	1,86	5,31
6	2,50	1,90	1,07	3,14	0,66
7	4,29	0,21	0,99	-0,57	1,30
8	6,01	2,92	0,68	-2,00	1,21
9	5,71	7,50	4,98	2,00	5,57
10	2,31	-1,23	0,95	4,94	0,15
Mittel	5,06	5,28	2,30	1,88	2,39

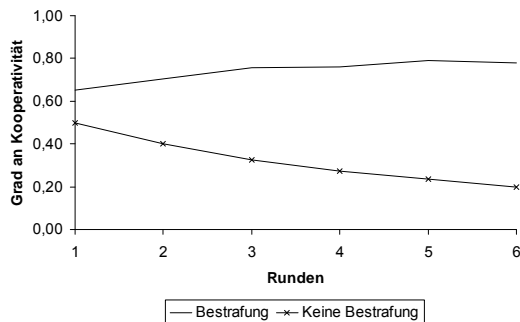
Tab. 11: Mittlere Auszahlung ab Runde 10

### 3.3.2 Experimentreihe Feedback

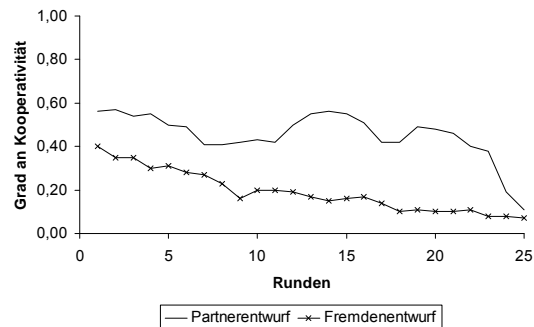
Um den Einfluss von Feedback, also die Hypothesen aus Abschnitt 3.1.3, näher zu untersuchen, wurde die Experimentreihe Feedback durchgeführt [SBV07a]. Hierfür wurde es den Teilnehmern ermöglicht nutzenneutral Feedback zu verschicken. Dies sollte den Aufwand für die Erstellung von Feedback in strukturierten Peer-to-Peer Systemen widerspiegeln. Hier ist der Aufwand für die Erstellung von Feedback vernachlässigbar, da die Teilnehmer ohnehin das Verhalten ihrer Nachbarn beobachten.

Abb. 17 vergleicht unterschiedliche Mechanismen zur Steigerung des Kooperationsgrads, einschließlich der Ergebnisse dieser Experimentreihe. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung des Kooperationsgrads über die Zeit. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Experimentreihe zeigen das Verhalten aller Teilnehmer mit Ausnahme des Freifahrers. Dieser Knoten folgte konkreten Vorgaben bezüglich seiner Strategie. Sein Verhalten ist daher nicht interessant. Der Grad der Kooperativität wurde für dieses Experiment berechnet, indem die Anzahl aller bearbei-

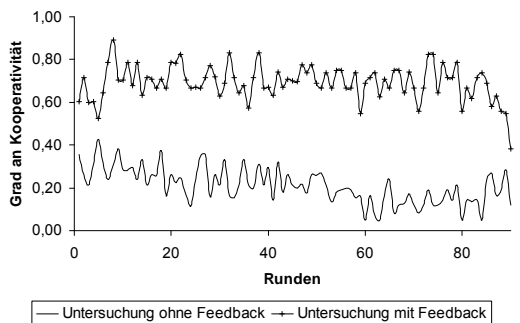
teten Anfragen pro Runde durch die Anzahl aller empfangenen Antworten pro Runde dividiert wurde.



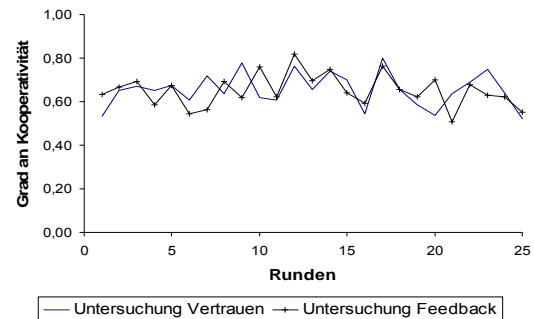
a) Untersuchungen von Fehr und Gächter [FeG02]



b) Untersuchungen von Keser und van Winden [KeW00]



c) Untersuchungen von Seinen und Schram [SeS01]



d) Experimentreihe Feedback

Abb. 17: Entwicklung des Kooperationsgrads

Abb. 17 a) zeigt die Ergebnisse der Experimente von Fehr und Gächter [FeG02]. Der Grad der Kooperativität in diesen Experimenten ist die Menge an Geld, die investiert wurde, geteilt durch das maximal investierbare Guthaben. Der Grad der Kooperativität nimmt über die Zeit ab, sofern kein Bestrafungsmechanismus vorhanden ist. Ist Bestrafung möglich, so ist der Grad an Kooperativität höher und sinkt in späteren Runden nicht. Die Ergebnisse von Keser und van Winden [KeW00] in Abb. 17 b) sind ähnlich. Der Grad der Kooperativität in den Untersuchungen mit Fremden sinkt über die Zeit. Der Grad an Kooperativität ist jedoch höher, wenn Partner interagieren. Auch die Ergebnisse von Seinen und Schram [SeS01] sind ähnlich (siehe Abb. 17 c)). Sie vergleichen das Verhalten von Teilnehmern, die Feedback austauschen, mit Teilnehmern, die kein Feedback austauschen können. Das Vorhandensein von Feedback erhöht den Grad der Kooperativität.

Beim Vergleich dieser Ergebnisse zu den Ergebnissen der hier vorgestellten Experimentreihe (siehe Abb. 17 d)), sind zwei Beobachtungen interessant: Zum Einen beeinflusst das Vorhandensein von Feedback den Grad der Kooperativität nicht. Zum Anderen ist der Grad der Kooperativität in der Untersuchung mit Feedback bzw. ohne etwa so hoch, wie der Grad der Kooperativität in den Untersuchungen mit einem der anderen Mechanismen in Abb. 17.

Der Grad der Kooperativität ist selbst in der Gegenwart eines Freifahrers so hoch, wie bei den anderen Systemen ohne Freifahrer. Dies zeigt, dass der Grad der Kooperativität in strukturierten Peer-to-Peer Systemen sogar noch höher ist als in einem Szenario, in dem nur Partner

interagieren, oder in einem Szenario von Fremden, die Feedback nutzen. Zudem ist das System robust, selbst in der Gegenwart von Freifahrern (etwa einer von sechs Teilnehmern).

Abgesehen von diesem ersten Eindruck, dass der Grad der Kooperativität im betrachteten System ähnlich der Kooperativität in anderen Systemen ist, sind weitere Analysen der Beobachtungen während der Untersuchungen schwierig. Für die unterschiedlichen, beobachteten Phänomene, wie den Grad an Kooperativität oder die Entwicklung über die Zeit, gibt es verschiedene Erklärungen. Auf der Basis der absoluten Zahlen allein sind keine Aussagen hierüber zu treffen. Zudem unterschieden sich die Experimente aus der Literatur mit den hier dargestellten Experimenten. Alle betrachteten Experimente unterscheiden sich in angewandten Szenario, sowie der Anzahl der Runden. Daher wird bei der Überprüfung der Hypothesen im Folgenden auf das Strategiespiel zurückgegriffen.

**Hypothese Indirekte Bestrafung:** Es wird erwartet, dass Teilnehmer Nachrichten in strukturierten Peer-to-Peer Systemen auf Basis des gesammelten Feedbacks bearbeiten, soweit keine anderen Informationen verfügbar sind (Hypothese Indirekte Bestrafung, (a)). Um diese Hypothese zu verifizieren, wird das Strategiespiel analysiert. Im Strategiespiel wurden den Teilnehmern Muster von negativen und positiven Feedbackobjekten über einen Knoten gezeigt. Dann wurden die Teilnehmer nach ihrer Strategie gefragt, d.h. sie wurden gefragt, ob sie für diesen Knoten eine Anfrage weiterleiten würden, wenn sie keine andere Information über diesen Knoten besäßen.

Tab. 12 zeigt die Ergebnisse des Strategiespiels bezüglich Feedback. Die Strategien können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- 1.) Strategien ohne Berücksichtigung von Feedback
- 2.) Strategien unter Berücksichtigung von Feedback

<i>Strategie</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Anz. Spieler</i>
<i>Immer kooperieren</i>	(1)	3
<i>Immer defektieren</i>	(1)	2
<i>Zufällige Strategien</i>	(1)	2
<i>Summe Kategorie (1)</i>		7
<i>Kooperation, wenn mehr positives als negatives Feedback empfangen wurde</i>	(2)	43
<i>Kooperation, wenn mindestens ein positives Feedback existiert</i>	(2)	4
<i>Kooperation, wenn weniger als n negative Feedbacks existieren</i>	(2)	16
<i>Summe Kategorie (2)</i>		63
<i>Keine Antwort abgegeben</i>		2

**Tab. 12: Im Strategiespiel beobachtete Feedbackstrategien**

Um zu prüfen, ob die Experimente die Hypothese stützen, dass Teilnehmer Feedback nutzen, wenn sie nur Feedbackinformationen über einen Teilnehmer besitzen, wurde eine Null-Hypothese eingeführt, die aussagt, dass Teilnehmer nicht auf der Basis von Feedback bestrafen. Von den 70 Teilnehmern, die am Strategiespiel teilgenommen haben, benutzten 63 (alle

Teilnehmer in Gruppe (2) Feedback. Damit kann die Null-Hypothese auf einem Signifikanzniveau von 1% abgelehnt werden. Dies stützt die Hypothese Indirekte Bestrafung.

Ist kein Feedback verfügbar, gehen wir davon aus, dass die Bestrafung vom Anteil der beantworteten Anfragen abhängt (Hypothese Indirekte Bestrafung, (2)). Es ist mit Schwellwertstrategien, ähnlich den in Abschnitt 3.3.1 beobachteten, zu rechnen. Da die entsprechende Hypothese bereits in vorangegangenen Abschnitten aufgestellt (siehe Abschnitt 3.1.2) und auf einem Signifikanzniveau von 1% bestätigt wurde (siehe Abschnitt 3.3.1), ist eine weitere Untersuchung dieser Fragestellung hier nicht notwendig.

**Hypothese Strategien ohne Feedback:** Um zu analysieren, ob die Experimente auch die Hypothese bestätigen, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen kein Feedback nutzen, wurde das Strategiespiel weiter untersucht. Die Teilnehmer an den Experimenten wurden nach den Strategien gefragt, die sie während der Untersuchungen gespielt haben. Dabei lag der Fokus auf drei Aspekten:

1. Wie wurde der Empfänger von Nachrichten ausgesucht?
2. Für welchen Knoten wurden Anfragen beantwortet?
3. Für welchen Knoten wurden Anfragen weitergeleitet?

Tab. 13 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

Um die Hypothese Strategie ohne Feedback zu bestätigen, wurden drei unterschiedliche Null-Hypothesen formuliert: (1) Teilnehmer wählen den Adressaten auf der Basis von Feedback beim Verschicken von Anfragen. (2) Teilnehmer beantworten Anfragen für andere Peers basierend auf Feedback. (3) Teilnehmer leiten Anfragen basierend auf Feedback weiter. Zur Validierung der Hypothese, dass die Strategien der Teilnehmer auf Feedback basieren, wurde ein Binomialtest herangezogen. Basierend auf diesem Test, konnten alle drei Null-Hypothesen auf einem Signifikanzniveau von 1% abgelehnt werden. Dies bestätigt die Hypothese Strategien ohne Feedback.

<i>Strategie</i>	<i>Anz. Spieler</i>
<i>Absenden von Anfragen:</i>	
<i>Strategien unabhängig von Feedback</i>	45
<i>Strategien abhängig von Feedback</i>	14
<i>Beantworten von Anfragen:</i>	
<i>Strategien unabhängig von Feedback</i>	39
<i>Strategien abhängig von Feedback</i>	20
<i>Weiterleiten von Anfragen:</i>	
<i>Strategien unabhängig von Feedback</i>	41
<i>Strategien abhängig von Feedback</i>	18

**Tab. 13: Strategiespiel bezüglich Feedback**

Obwohl Feedback hilfreich ist, wenn keine weiteren Informationen verfügbar sind, nutzen Teilnehmer es nicht, sobald andere Informationen, wie eigene Beobachtungen der Kontakte, zur Verfügung stehen.

**Hypothese Kein Einfluss von Feedback auf Auszahlung:** Schließlich soll die Hypothese, dass Feedback nicht zu einem signifikanten Anstieg der Auszahlung der Teilnehmer führt, überprüft werden. Hierfür wird die Summe der Auszahlungen der kooperativen Spieler zwischen der fünften und zwanzigsten Runde untersucht. Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 wird auf die Betrachtung der anderen Runden verzichtet, um Start- und Endspiel-Effekte zu vermeiden [SeS86]. Tab. 14 zeigt die Punkte, welche die Teilnehmer im Durchschnitt pro Runde verdient haben.

<i>Gruppe</i>	<i>Untersuchung Vertrauen</i>	<i>Untersuchung Feedback</i>
1	3,32	3,99
2	1,21	3,21
3	-0,06	-0,45
4	2,34	1,42
5	3,74	3,53
6	4,53	1,51
7	-0,06	-0,66
8	-0,55	-0,81
9	4,70	3,06
10	0,24	1,82
11	1,39	1,46
12	3,81	2,22

**Tab. 14: Mittlerer Punktergebnis pro Knoten und Runde**

Es wurde die folgende Null-Hypothese aufgestellt: Die Auszahlung in der Untersuchung Feedback ist höher als die Auszahlung in der Untersuchung Vertrauen. Für 8 von 12 Gruppen ist die Auszahlung in der Untersuchung mit Feedback geringer als in der Untersuchung mit Vertrauen. Damit kann die Null-Hypothese auf einem Signifikanzlevel von 1% mit Hilfe eines Binomialtests abgelehnt werden. Dies bestätigt die Hypothese, dass Feedback keinen Einfluss auf die Auszahlung der Teilnehmer besitzt.

Die Summe der Auszahlungen über alle Untersuchungen mit Vertrauen ist 30,54 Punkte, während die Summe der Auszahlungen in Untersuchungen mit Feedback 28,36 Punkte ist. Dies untermauert die Hypothese, dass Feedback die Auszahlung der Teilnehmer nicht erhöht.

### 3.3.3 Experimentreihe Heterogenität

Wie in Abschnitt 3.3.2 gezeigt werden konnte, ist der erreichte Grad an Kooperativität in strukturierten Peer-to-Peer Systemen schon auf Basis eigener Beobachtungen der Nachbarn hoch. Selbst der Einsatz von Feedback führt nicht zu einer Steigerung des kooperativen Verhaltens. Im Folgenden werden die Ursachen für den hohen Grad an Kooperativität untersucht [SBV07b]. Für die entsprechende Analyse sind heterogene Systeme, d.h. Systeme in welchen die Teilnehmer unterschiedlichen Nutzen bei der Bereitstellung und beim Konsum von Diensten, besonders interessant: Hier spielen Aspekte wie Fairness eine Rolle.

In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 3.1.4 hergeleiteten Hypothesen evaluiert. Hierfür wird auf die Ergebnisse des Strategiespiels und der Untersuchungen zurückgegriffen.

**Hypothese Kein Strategiewechsel:** Um zu analysieren, ob die Teilnehmer ihre Strategie gegenüber anderen Teilnehmern ändern, die deutlich mehr verdienen als sie selbst (Hypothese

Kein Strategiewechsel), wird im Folgenden das Strategiespiel der Untersuchung mit Information analysiert. Für dieses Strategiespiel wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Strategie gegenüber dem ausgewählten Teilnehmer und gegenüber den anderen Teilnehmern zu beschreiben.

<i>Strategie</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Anz. Spieler</i>
<i>Gleiche Strategie für alle Spieler</i>	(1)	38
<i>Anfragen werden bevorzugt an den ausgewählten Knoten geschickt</i>	(2)	10
<i>Anfragen werden nicht an den ausgewählten Knoten geschickt</i>	(3)	2

**Tab. 15: Verhaltensänderungen beim Abschicken von Anfragen**

Tab. 15 und Tab. 16 fassen die Ergebnisse zusammen. Zur Klassifikation des beobachteten Verhaltens werden drei unterschiedliche Gruppen genutzt:

- 1.) Gleiche Strategie gegenüber allen Spielern unabhängig von deren Auszahlung
- 2.) Kooperativere Strategie gegenüber dem ausgewählten Knoten
- 3.) Weniger kooperative Strategie gegenüber dem ausgewählten Knoten

In den meisten Fällen war die Strategie gegenüber dem ausgewählten Knoten die gleiche, wie gegenüber allen anderen Knoten (Kategorie (1)). Während einige Teilnehmer ihre Anfragen bevorzugt über den ausgewählten Knoten verschicken (Kategorie (2)), schicken nur wenige keine Anfragen über ihn (Kategorie (3)). Die Situation ändert sich beim Weiterleiten und Beantworten. Eine Mehrheit der Teilnehmer unterscheidet noch immer nicht zwischen den unterschiedlichen Teilnehmern. Unter den übrigen Teilnehmern entscheidet sich ein geringerer Teil dazu mit dem ausgewählten Knoten zu kooperieren, verglichen mit dem Abschicken von Anfragen (Kategorie (2)). D.h., es existiert eine geringe Tendenz unter den Teilnehmern den ausgewählten Teilnehmer zu bestrafen. Diese Tendenz ist jedoch nicht statistisch signifikant. Im Mittel ändern sich die Strategien nicht. Selbst für den Fall des Anfragebeantwortens, in dem die meisten Teilnehmer, verglichen mit Abschicken und Weiterleiten, ihr Verhalten gegenüber dem ausgewählten Teilnehmer ändern, bestätigt dies ein Binomialtest auf einem Signifikanzniveau von 1%.

<i>Strategie</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Anzahl Spieler</i>	
		<i>Beantworten</i>	<i>Weiterleiten</i>
<i>Gleiche Strategie für alle Spieler</i>	(1)	34	37
<i>Anfragen des ausgewählten Peers werden bevorzugt bearbeitet</i>	(2)	4	5
<i>Anfragen des ausgewählten Peers werden nicht bearbeitet</i>	(3)	12	8

**Tab. 16: Verhaltensänderungen beim Antworten und Weiterleiten**

**Hypothese Auszahlung/Effizienz:** Um zu untersuchen, ob die Heterogenität der Teilnehmer einen Einfluss auf die Effizienz des Systems hat, wurden die Auszahlungen aller Teilnehmer (mit Ausnahme der ausgewählten Knotens) in Untersuchung Standard und in Untersuchung ohne Information verglichen (siehe Tab. 17).

Während die Auszahlung aller Knoten mit normalem Nutzen in der Hälfte aller Gruppen steigt, sinkt sie in der anderen Hälfte. Damit lässt sich auf annehmbarem Signifikanzniveau weder bestätigen, dass die Auszahlung steigt, noch dass sie fällt. D.h. obwohl die Teilnehmer in der Untersuchung ohne Information wussten, dass einer der Teilnehmer deutlich mehr verdiente als sie selbst, spielten sie weiter wie im homogenen Fall. Dies bestätigt, dass Heterogenität die Effizienz nicht erhöht.

Gruppe	Nicht Ausgewählte Knoten		Ausgewählte Knoten	
	Untersuchung Standard	Untersuchung ohne Information	Untersuchung ohne Information	Untersuchung mit Information
1	9,16	8,72	53,87	53,33
2	7,40	10,57	87,33	22,80
3	7,01	7,65	88,40	66,53
4	9,21	5,81	42,27	42,67
5	5,56	5,67	80,73	53,87
6	9,50	8,71	75,27	81,73
7	8,63	10,25	46,13	67,60
8	8,49	10,36	73,87	73,60
9	6,01	3,49	12,60	61,00
10	6,61	1,92	23,40	30,47

**Tab. 17: Auszahlung**

Dieses Ergebnis deutet ebenfalls darauf hin, dass strukturierte Peer-to-Peer Systeme effizienter sind als unstrukturierte: Empirische Studien unstrukturierter Peer-to-Peer Systeme (siehe Abschnitt 2.5.3) zeigen, dass 75% der Teilnehmer Freifahrerverhalten zeigt. Selbst in unstrukturierten Systemen mit Gegenmaßnahmen gegen Freifahrerverhalten ist ein Anteil von Teilnehmern mit Verhalten ähnlich Freifahrern zu beobachten (siehe Abschnitt 2.5.3). In diesem System tragen die Teilnehmer nur im minimalen, vom System erzwungenen Grad bei. Die, in dieser Experimentreihe beobachteten, hohen Auszahlungen sind mit einem solch hohen Anteil von Freifahrern nicht möglich. Zudem bestätigt die Untersuchung ohne Information diese Ergebnisse.

Gruppe	Standard Untersuchung	Untersuchung ohne Information	Untersuchung mit Information
1	14,17	15,40	17,60
2	14,50	18,60	19,60
3	16,33	17,20	18,20
4	16,50	17,80	18,00
5	14,00	17,20	19,00
6	16,50	16,00	18,60
7	16,83	19,40	19,60
8	15,83	19,00	19,20
9	14,67	16,00	15,80
10	14,83	11,60	15,60

**Tab. 18: Anzahl der abgesetzten Anfragen**

**Hypothese Kein Verlassen:** Um zu untersuchen, ob Teilnehmer dazu tendieren das System zu verlassen, sobald Heterogenität eingeführt wird, wird die Anzahl der abgesetzten Anfragen in

verschiedenen Untersuchungen betrachtet. Dabei wird nicht zwischen normalen Teilnehmern und dem ausgewählten Teilnehmer unterschieden (siehe Tab. 18).

Die Anzahl der abgesetzten Anfragen in Untersuchung Standard ist nur bei einer Gruppe höher als in den anderen Untersuchungen. Obwohl ein Teilnehmer mehr verdient als alle anderen, nehmen die Teilnehmer also mit derselben Intensität am System teil.

### 3.4 Implikationen der Ergebnisse

Die verhaltensökonomischen Experimente zu strukturierten Peer-to-Peer Systemen erbrachten drei wesentliche Erkenntnisse:

1. Indirekte Partner Interaktion, d.h. die Interaktion mit Fremden über Partner, führt dazu, dass die Teilnehmer einen Anreiz besitzen, sich kooperativ zu verhalten. Dies ist auf reziproke Schwellwert Strategien zurückzuführen. D.h. Teilnehmer kooperieren mit anderen, wenn diese ihnen in der Vergangenheit einen gewissen Anteil ihrer Anfragen bearbeitet haben.
2. Feedback führt nicht zu einer Steigerung der Kooperativität gegenüber einem System, in dem ausschließlich Indirekte Partner Interaktion auftritt. Eine Umsetzung von Feedback ist damit nicht nötig.
3. Indirekte Partner Interaktion führt dazu, dass die Teilnehmer auch mit Teilnehmern kooperieren, die mehr verdienen als sie selbst. Die Heterogenität eines Systems bezüglich der Auszahlung hat folglich keine Auswirkung auf das Verhalten der Teilnehmer.

Im Folgenden werden Implikationen der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse auf den Entwurf von strukturierten Peer-to-Peer Systemen betrachtet. Dabei wird zunächst auf die Strategiewahl der Teilnehmer eingegangen, danach werden Implikationen für den Entwurf zukünftiger strukturierter Peer-to-Peer Systeme erläutert, ehe auf andere verteilte koordinatorfreie Systeme eingegangen wird.

#### 3.4.1 Gewählte Strategien

In der Literatur werden Freifahrerverhalten und Weißwaschen als Verhaltensmuster betrachtet, welche die Teilnehmer nutzen können, um das System auszunutzen. Im Folgenden wird auf Basis der beobachteten Ergebnisse untersucht, in wieweit diese Strategien eine Gefahr für das System selbst darstellen.

**Freifahrerverhalten:** Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.1 zeigen, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit anderen kooperieren, die sie für kooperativ halten. Andererseits, erwarten sie auch kooperatives Verhalten von anderen, wenn sie mit diesen in der Vergangenheit kooperierten. Es ist damit essentiell, dass kooperative Teilnehmer in Peer-to-Peer Systemen besser behandelt werden als unkooperative. Folglich kann in strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit kooperativem Verhalten der Teilnehmer gerechnet werden. Das reziproke Verhalten der Teilnehmer führt auch dazu, dass sich Freifahrerverhalten nicht lohnt. Die Auszahlung des Freifahrers ist immer geringer als seine Auszahlung, wenn er sich kooperativ verhält. Menschliche Teilnehmer erkennen dies intuitiv: Während unserer Experimente verhielt sich kein Teilnehmer unkooperativ, außer er wurde dazu aufgefordert. Die Beobachtung der Nach-



barn in strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit sechs Teilnehmern schützt somit vor Freifahrerverhalten.

**Weißwaschen.** Gemäß den Ergebnissen von van Winden tendieren Teilnehmer, die ihr Gegenüber in einer Interaktion als Partner identifizieren, dazu, kooperativer zu sein als in Systemen mit Fremden. Dies gilt im Besonderen für den Beginn einer Interaktion [KeW00]. Dies wird problematisch, sobald die Teilnehmer Weißwaschen betreiben [FPC06]. D.h. sobald ein Teilnehmer ein System betritt und solange Anfragen stellt, bis er als Freifahrer überführt wurde - das System dann wieder verlässt und erneut in das System eintritt. Durch den Einsatz von Feedback könnte dieser Effekt reduziert werden: Ehrliches Feedback könnte helfen, solch negatives Verhalten deutlich schneller zu erkennen. Feedback ist aber nicht notwendigerweise ehrlich.

Zudem ist in strukturierten Peer-to-Peer Systemen nicht mit Weißwaschen zu rechnen: In Abschnitt 3.3.1 wurde gezeigt, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen Schwellwertstrategien spielen: Teilnehmer A bearbeitet Anfragen nur dann für Teilnehmer B, wenn B einen bestimmten Prozentsatz der Anfragen von A bearbeitet hat. Ein Teilnehmer, der keine Anfragen für andere bearbeitet kann nach wenigen Runden identifiziert werden. Seine Anfragen werden dann nicht mehr weitergeleitet. Auf diese Weise müssen Teilnehmer die das System betreten zunächst ihre Bereitschaft etwas beizutragen beweisen, indem sie Anfragen bearbeiten. Die beschriebenen Experimente legen nahe, dass ‚etablierte‘ Knoten sonst nicht bereit sind Anfragen neuer Knoten zu bearbeiten. Dies bedeutet, dass Weißwaschen nicht attraktiv ist. Von einer geringfügig anderen Perspektive ist Feedback selbst in der Gegenwart neuer Knoten, die das System betreten, nicht hilfreich: In einem System ohne Feedback sind strategische Manipulationen von Feedback nicht möglich.

Selbst wenn es einem Knoten, der Weißwaschen betreibt, möglich wäre, nach dem Betreten des Systems eine Anfrage abzusetzen und während der ersten Runden etwas vom System zu profitieren, ist dieses aus zwei Gründen nicht problematisch: Zum Einen, bricht das System nicht zusammen, selbst wenn einer der sechs Teilnehmer unkooperativ ist. Mit anderen Worten, ein strukturiertes Peer-to-Peer System toleriert selbst einen relativ großen Anteil unkooperativer Peers. Zum Anderen, sinkt die Auszahlung eines Knotens, wenn er von kooperativem auf unkooperatives Verhalten wechselt. Mit anderen Worten: rationale Teilnehmer haben einen Anreiz sich stets kooperativ zu verhalten.

### 3.4.2 Systementwurf

Neben den Implikationen der verhaltensökonomischen Experimente auf die genutzten Strategien in strukturierten Peer-to-Peer Systemen existieren auch Implikationen für den Entwurf solcher Systeme. Dazu zählt zum einen die Realisierung von Feedbackspeichern, die Umsetzung von Schwellwerten und die maximal tolerierbare Größe des Systems.

**Global gegen lokale Feedbackspeicher.** In Abschnitt 3.3.2 wurde gezeigt, dass sich Teilnehmer in den meisten Situationen nicht auf lokale Feedbackspeicher verlassen. Aus der Perspektive eines Teilnehmers ist solches Feedback vertrauenswürdiger als Feedback in globalen Feedbackspeichern: Der Teilnehmer sammelt nur Feedback Informationen, die von seinen Nachbarn abgeschickt wurden, d.h. die von Teilnehmern kommen, die er relativ gut kennt. Da die Teilnehmer sich nicht auf lokale Feedbackspeicher verlassen, kann davon ausgegangen werden, dass sie sich auch nicht auf Feedback in einem globalen Feedbackspeicher verlassen würden. In solchen Feedbackspeichern ist die Wahrscheinlichkeit, dass das gespeicherte Feedback falsch ist, noch höher.

**Wahl des Schwellwertes.** In der Literatur wurde bisher nicht explizit auf die Wahl des Schwellwertes von Schwellwertstrategien eingegangen. Der Schwellwert wird zu Beginn einer Simulation gesetzt und dann nicht mehr geändert (siehe z.B. BöB06). Prinzipiell existieren zwei Vorgehensweisen: (a) Der Schwellwert wird global festgesetzt. (b) der Schwellwert wird kontinuierlich an die Mittlere Kooperativität der Teilnehmer angepasst. Während Alternative (a) die Fairness als Verhaltensmotiv nutzt – alle Teilnehmer müssen genau gleichviel beitragen – trägt Alternative (b) dem Wettbewerb Rechnung. Ein Teilnehmer, der hier nicht mindestens so kooperativ ist wie der durchschnittliche Teilnehmer, bekommt keine Anfragen beantwortet. Die hier vorgestellten Ergebnisse legen nahe, dass Alternative (b) zu höherer Effizienz führt.

**Größe des Systems.** Die Größe des strukturierten Peer-to-Peer Systems, das in den Experimenten genutzt wurde, hat keinen Einfluss auf die gespielten Strategien: In strukturierten Peer-to-Peer Systemen jeder Größe, interagiert ein Peer immer mit zwei Arten von Teilnehmern, seinen Nachbarn und entfernten Peers. Da es in solchen Systemen keine zentrale Instanz gibt, kann jeder Teilnehmer sich nur auf die Informationen (eigene Beobachtungen und Feedback) verlassen, die er selbst gesammelt hat. Würde ein Teilnehmer feststellen, dass er Teil eines Systems von sechs Knoten wäre, würde dies sein Verhalten nicht beeinflussen: Er würde noch stets keine weiteren Informationen über die Teilnehmer im Netz besitzen, die keine Nachbarn von ihm sind. Er müsste also auch weiterhin auf die Zuverlässigkeit der Weiterleiter vertrauen. Natürlich könnte ein größeres Netz die absoluten Werte beeinflussen, aber das Strategiespiel zeigte keinen Hinweis darauf, dass dies das Verhalten der Teilnehmer beeinflusst.

Ein anderer Punkt ist, dass andere strukturierte Peer-to-Peer Systeme deutlich weniger Hops für das Weiterleiten von Nachrichten benötigen, als inhaltsadressierbare Netze: Der Anzahl der Hops in Chord ist beispielsweise logarithmisch in der Anzahl der Teilnehmer [SMK03], verglichen zu einem zwei-dimensionalen inhaltsadressierbaren Netz, indem diese Zahl mit der Wurzel der Teilnehmer steigt [RFH01] (siehe Abschnitt 2.1.3). Für die hier durchgeführten Analysen wird nur auf inhaltsadressierbare Netze zurückgegriffen, da für diese eine Implementierung eines lokalen Feedbackspeichers existierte [BöB06]. Die Ergebnisse sollten aber auch für andere strukturierte Peer-to-Peer Systeme gelten, wenn die Interaktionen hier bilateral sind: Die Teilnehmer in den Experimenten konnten nicht erkennen, welche Struktur das gewählte System besaß. Selbst wenn also die Anzahl der Peers einen qualitativen Einfluss auf das System hätte (wofür es keine Indizien gibt), wäre dies kein Problem: Aus praktischer Sicht ist die Anzahl der Hops mehr oder weniger begrenzt unabhängig von der Anzahl der Teilnehmer.

Die Größe spielt auch bei den Experimenten bezüglich der Heterogenität der Teilnehmer (siehe Abschnitt 3.3.3) keine Rolle: Genau ein Teilnehmer besitzt einen deutlich größeren Nutzen als alle anderen Teilnehmer. Fast alle Teilnehmer haben diesen Teilnehmer zum Nachbarn und können ihn bestrafen. In einer der drei Untersuchungen, Untersuchung mit Information, kannte sogar jeder andere Teilnehmer diesen Teilnehmer. In größeren Systemen ist die Unterscheidung zwischen Teilnehmern mit hoher Auszahlung und Teilnehmern mit geringer Auszahlung deutlich schwerer. Mit anderen Worten: Da schon dieser Extremfall zeigt, dass Heterogenität keinen negativen Einfluss auf die Effizienz des Systems hat, kann davon ausgegangen werden, dass dies auch in größeren Systemen so ist.

### 3.4.3 Übertragbarkeit auf andere Systeme

Schließlich soll darauf eingegangen werden, welche Implikationen die beschriebenen Ergebnisse auf andere verteilte koordinatortreie Systeme besitzen. Dabei liegt der Fokus auf der Gene-

ralisierbarkeit der Ergebnisse für andere Systeme und der Implikation der Ergebnisse auf jüngere Studien zu verteilten Systemen (insbesondere unstrukturierte Peer-to-Peer Systeme).

**Generalisierbarkeit der Ergebnisse.** Die hier vorgestellten Ergebnisse gelten auch für andere Systeme, insbesondere für Systeme in welchen autonome Knoten mit anderen über entfernte Kommunikationskanäle interagieren, wie spezielle Varianten von Sensornetzen oder das Internet. Solche Systeme könnten Indirekte Partner Interaktion nutzen: Die Knoten könnten mit einer überschaubaren Menge anderer Teilnehmer wiederholt interagieren, wobei ein globales Schema die Interaktionsstruktur definiert. In solchen Systemen könnte Indirekte Partner Interaktion helfen, andere Teilnehmer zu motivieren einen höheren Grad an Kooperativität zu zeigen, als in Systemen ohne solche Struktur. Unsere Ergebnisse haben auch Implikationen auf soziale Netzwerke (obwohl hierfür zusätzliche Experimente notwendig sind). Menschen sind oft Teil von Strukturen, die sie sich nicht selbst aussuchen können. Zu solchen Systemen gehören Netzwerke von Verwandten, Nachbarn oder Kollegen, die man sich typischerweise nicht selbst aussuchen kann. (Natürlich sind soziale Netzwerke nicht das perfekte Beispiel für Systeme der Indirekten Partner Interaktion – jeder kann sich einen Teil seiner Kontakte, wie Freunde oder Geschäftspartner, selbst aussuchen. Zudem haben nicht alle sozialen Netzwerke eine zu Grunde liegende Struktur. So gibt es beispielsweise für die Menge aller eBay Teilnehmer kein solches Netzwerk. Die gegenteilige Annahme, dass jedes soziale Netzwerk keine zu Grunde liegende Struktur besitzt, ist auch nicht realistisch. Eine tiefer greifende Untersuchung von Phänomenen in sozialen Netzwerken, die durch Indirekte Partner Interaktion erklärt werden kann, bleibt Teil zukünftiger Arbeiten.)

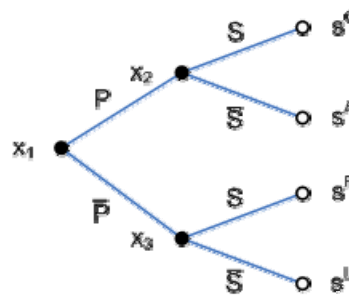
**Existierende Studien.** Die hier vorgestellten Ergebnisse erleichtern auch das Verständnis existierender Reputationsmechanismen. In den letzten Jahren wurden Dateitauschbörsen mit Reputationsmechanismen entwickelt. Studien bezüglich dieser Systeme [SGG02] zeigen, dass sich die Teilnehmer in solchen Systemen nicht wie gewünscht verhalten. In den betrachteten Systemen (bitTorrent und eMule) zwingt der Reputationsmechanismus die Teilnehmer dazu Ressourcen auf der Basis der konsumierten Ressourcen bereitzustellen. Der dort genutzte Schwellwert ist fest. Die Teilnehmer werden also nicht mit Wettbewerb konfrontiert. Die Teilnehmer bevorzugen folglich faire Ergebnisse: Jeder versucht gleich viel beizutragen, wie alle anderen. Die Effizienz des Systems ist niedrig und der Anteil der Teilnehmer, die zum System mehr beitragen als sie müssen, ist überschaubar. Die hier vorgestellten Ergebnisse legen nahe, dass die Einführung von Wettbewerb in das System dies ändern könnte. Für jeden Teilnehmer könnte sein Grad an Kooperativität gemessen werden und mit dem mittleren Grad an Kooperativität aller Teilnehmer verglichen werden. Ein Teilnehmer, der viel konsumieren wollte, müsste dann auch viel beitragen. Wenn sich der Schwellwert am mittleren Beitrag aller Teilnehmer orientiert, hätten alle Teilnehmer einen Anreiz sich in das System einzubringen. Dies würde zu einem hohen Maß an Kooperativität führen.



## 4 Ableitung eines formalen Modells

Auf der Basis des in Abschnitt 3 beobachteten Verhaltens soll in diesem Abschnitt ein formales Modell für das Verhalten der Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen erstellt werden. Bei der Modellierung verteilter Systeme aus ökonomischer Sicht liegt der Fokus auf dem Nutzen der einzelnen Knoten. Abhängig vom Nutzen wählt ein Knoten seine Strategie aus. Um dies im Modell abzubilden, wird jeder möglichen Aktion eines Knotens gemäß der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Kosten- und Erlös-Struktur ein Wert zugeordnet. Abhängig von den Aktionen, wird schließlich der Nutzenwert einer Strategie als Summe der Kosten und Erlöse der einzelnen Aktionen berechnet. Mit Hilfe einer monoton steigenden Funktion kann dieser Wert dann auf den Nutzen eines Teilnehmers abgebildet werden.

Sei die Menge der Spieler im System gegeben als  $I = \{1, \dots, n\}$ . Wie in den verhaltensökonomischen Experimenten wird davon ausgegangen, dass das Spiel in Runden durchgeführt wird. D.h. jeder Spieler entscheidet ein Mal pro Runde, wie er alle neu eintreffenden Anfragen bearbeitet. Jede Runde kann jeder einzelne Spieler aus drei möglichen Aktionen wählen: Abschicken von Anfragen (Aktion S), Weiterleiten von Anfragen (Aktion F) und beantworten von Anfragen (Aktion A). Um die Analyse mathematisch überschaubar zu halten, wird im Modell nicht zwischen Weiterleiten (Aktion F) und Beantworten von Anfragen (Aktion A) unterschieden. Stattdessen bearbeiten die Spieler Anfragen (Aktion P). Weiterhin wird nicht zwischen den einzelnen Anfragen unterschieden, d.h. ein Spieler bearbeitet entweder alle eingehenden Anfragen oder keine. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass diese Vereinfachung keinen Einfluss auf das Ergebnis besitzt. Aktion P ist die Summe aller Anfragen, die ein Spieler  $i$  in einer bestimmten Periode entweder weiterleitet oder beantwortet. Obwohl es für einen Spieler möglich wäre, nur einen Teil der eingehenden Nachrichten zu bearbeiten, ist dies nicht realistisch: Die verhaltensökonomischen Experimente (siehe Kapitel 3) gaben keinen Anlass zu der Vermutung, dass Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen ihre Strategie von Anfrage zu Anfrage ändern.



**Abb. 18: Strategische Möglichkeiten eines Knotens pro Runde**

Abb. 18 zeigt die strategischen Möglichkeiten eines Spielers pro Runde. Im Wesentlichen muss jeder Spieler  $i$  pro Runde zwei Entscheidungen treffen: Zum Einen muss er entscheiden, ob er eingehende Anfragen bearbeitet, zum Anderen muss er entscheiden, ob er selbst Anfragen abschickt. Wenngleich in Abb. 18 die Entscheidung für das Bearbeiten einer Anfrage vor der Entscheidung für das Abschicken einer Anfrage modelliert ist, so hat die Reihenfolge der Entscheidungen keinen Einfluss auf das Spielergebnis. Es ist lediglich wichtig, dass die Entscheidungen nacheinander getroffen werden.

Ausgehend von den möglichen Aktionen kann Spieler  $i$  jede Runde aus einer von vier Strategien wählen: Erstens, kann er das System verlassen ( $s^L$ ), indem er weder Anfragen abschickt noch bearbeitet ( $s^L = (\bar{P}, \bar{S})$ ). Zweitens, kann er sich altruistisch verhalten ( $s^A$ ), indem er nur

Anfragen beantwortet oder weiterleitet ( $s^A = (P, \bar{S})$ ). Drittens, kann er Freifahrerverhalten betreiben ( $s^F$ ), indem er nur eigene Anfragen abschickt ohne Anfragen anderer Spieler zu bearbeiten ( $s^F = (\bar{P}, S)$ ). Viertens, kann er voll kooperieren ( $s^C$ ), indem er Anfragen anderer bearbeitet und eigene Anfragen abschickt ( $s^C = (P, S)$ ). Die Kombination aller vier reinen Strategien definiert den Strategieraum eines Spielers  $S_i = \{s^L, s^A, s^F, s^C\}$ .

Daneben sind keine anderen reinen Strategien möglich: Alle möglichen Kombinationen der Aktionen (Aktion P und Aktion S) sind berücksichtigt. Neben diesen, so genannten reinen Strategien, könnte ein Spieler auch gemischte Strategien [FuT91] nutzen. D.h. er würde mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einer Strategie, beispielsweise  $s^A$ , folgen, während er in den übrigen Fällen eine andere Strategie nutzt, beispielsweise  $s^F$ . Die aus gemischten Strategien resultierenden Gleichgewichte sind jedoch in der Regel nicht stabil [BEG04]. D.h. die Spieler müssen zuverlässig immer mit derselben Wahrscheinlichkeit einer Strategie folgen, dies ist nicht realistisch und führt nicht zu stabilen Gleichgewichten.

Im nächsten Schritt werden den einzelnen Aktionen, die ein Spieler durchführen kann, nun Kosten zugeordnet. Jede Aktion bedeutet bestimmte Kosten für den Spieler  $i$ . So bedeutet das Abschicken einer Anfrage die Kosten  $c_i(S)$ , das Bearbeiten aller eingehenden Anfragen impliziert die Kosten  $c_i(P) < 0$ . Dabei setzt sich  $c_i(P)$  aus der Summe aller Kosten für das Beantworten eingehender Anfragen und den Kosten für das Weiterleiten aller eingehenden Anfrage zusammen. Um die Übersichtlichkeit des formalen Modells zu gewährleisten, werden stochastische Aspekte des strukturierten Peer-to-Peer Systems vernachlässigt: Jeder Spieler muss die gleiche Anzahl von Anfragen in jeder Runde beantworten. Wie schon bei den verhaltensökonomischen Experimenten (siehe Abschnitt 3.2) wird davon ausgegangen, dass die Kosten für das Bearbeiten von Anfragen geringer sind als die Kosten für das Abschicken von Anfragen. Es gilt demnach  $c_i(P) < c_i(S) < 0$ . Für jedes Anfrageergebnis, das ein Spieler, erhält wird ihm der Erlös  $b_i(R) > 0$  gutgeschrieben. Im Allgemeinen unterscheiden sich die Kosten und die Erlöse zwischen den unterschiedlichen Teilnehmern. Im Folgenden wird jedoch zunächst davon ausgegangen, dass die Kosten und Erlöse für alle Teilnehmer gleich sind. D.h. im Folgenden gilt  $c_i(P) = c(P)$ ,  $c_i(S) = c(S)$  und  $b_i(R) = b(R)$  für alle Spieler  $i$ .

Das Erhalten von Anfrageergebnissen ist kein sicheres Ereignis. Selbst wenn ein Spieler eine Anfrage abschickt, weiß er nicht sicher, ob diese Anfrage beantwortet wird oder nicht. Im Modell wird diese Unsicherheit durch die Überzeugung  $\mu_i$  ausgedrückt. Dieser Wert repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, mit welcher der Spieler  $i$  basierend auf seinen Beobachtungen in der Vergangenheit davon ausgeht, dass er diese Runde ein Anfrageergebnis erhält. Die Überzeugung  $\mu_i$  eines Spielers hängt dabei von der Strategiewahl der anderen Spieler ab. Zudem beeinflusst die Strategiewahl des Spielers  $i$  die Strategiewahl der anderen Spieler. Damit hängt  $\mu_i$  indirekt von der Strategiewahl des Spielers  $i$  ab. Diese Abhängigkeit spiegelt die Tatsache wider, dass Freifahrer nicht kooperatives Verhalten so vieler anderer Spieler erwarten können wie wenn sie sich kooperativ verhalten würden: Spieler können von kooperativem Verhalten zu unkooperativem Verhalten wechseln, wenn nicht ausreichend viele ihrer Anfragen bearbeitet werden. Im Folgenden werden zunächst Gleichgewichte für konstante Werte für die Überzeugungen der Teilnehmer bestimmt, ehe Gleichgewichte betrachtet werden, in welchen  $\mu_i$  die Strategien aller anderen Teilnehmer beeinflusst. Die Benutzung einer globalen Überzeugung  $\mu_i$  ist eine Vereinfachung. Spieler  $i$  beobachtet nicht das Verhalten jedes einzelnen Spielers im System, sondern das Verhalten des Systems als Ganzes. In Abschnitt 4.2 wird das Modell so erweitert, dass es auch die Beobachtung des Verhaltens einzelner Spieler erlaubt.

Weiterhin verringert das Erhalten eines Anfrageergebnisses später dessen Wert durch einen exogen gegebenen Abzinsungsfaktor  $\beta$  pro Runde. D.h. wenn das Erhalten eines Anfrageergebnisses in dieser Runde den Wert  $w$  hat, so hat es in der nächsten Runde den Wert  $w \cdot \beta$ . Dieser Abzinsungsfaktor spiegelt wider, dass Anfrageergebnisse nicht in der aktuellen Runde, sondern erst in einer Folgerunde erhalten werden können. Die Berücksichtigung des Abzinsens ist essentiell, wenn realistische Systeme betrachtet werden. Teilnehmer eines Peer-to-Peer Systems bleiben nicht unendlich lange im System. Es lässt sich auch nicht garantieren, dass das Peer-to-Peer System für immer besteht. Deshalb bevorzugen es Teilnehmer Anfrageergebnisse in der aktuellen Runde zu erhalten gegenüber dem Bezug von Anfrageergebnissen in der Zukunft. Dies wird durch Abzinsen abgebildet.

Tab. 19 visualisiert die Auszahlungen des Spielers abhängig von den getroffenen Strategieentscheidungen.

	$P$	$\bar{P}$	$S$	$\bar{S}$	Erwartete Auszahlung	Summe
Strategie Verlassen	-	0	-	0	0	0
Strategie Altruismus	$c(P)$	-	-	0	0	$c(P)$
Strategie Freifahren	-	0	$c(S)$	-	$\mu_i \beta b(R)$	$\mu_i \beta b(R) + c(S)$
Strategie Kooperation	$c(P)$	-	$c(S)$	-	$\mu_i \beta b(R)$	$\mu_i \beta b(R) + c(S) + c(P)$

**Tab. 19: Auszahlungen abhängig von der Strategiewahl pro Runde**

Die Auszahlung eines Spielers  $i$  ist die Summe der Auszahlungen für jede Aktion, die er wählt. Der Wert der einzelnen Strategien ist für einen Spieler  $i$  wie folgt:

- Strategie Verlassen:  $v_i(s^L) = 0$
- Strategie Altruismus:  $v_i(s^A) = c(P)$
- Strategie Freifahren:  $v_i(s^F) = \mu_i \beta b(R) + c(S)$
- Strategie Kooperation:  $v_i(s^C) = \mu_i \beta b(R) + c(S) + c(P)$

In Systemen, in welchen das Verhalten der Teilnehmer auch von Fairness beeinflusst ist, würden die Werte für alle vier reinen Strategien dies widerspiegeln: Die Strategien Verlassen und Freifahren müssten um einen Strafterm erweitert werden, der die Ungleichheitsaversion widerspiegelt (siehe [FeS99]). Da aber in Abschnitt 3.3.3 gezeigt wurde, dass die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen von Wettbewerb und nicht von Fairness motiviert werden, sind entsprechende Erweiterungen nicht nötig.

Ausgehend vom verbliebenen Strategieraum, wählt jeder Spieler jede Runde die Strategie, welche die Differenz aus seinem Erlös und seinen Kosten maximiert.

$$\begin{aligned}
 v_i &= \max\{v_i(s^L), v_i(s^A), v_i(s^F), v_i(s^C)\} \\
 &= \max\{0, c(P), \mu_i \beta b(R) + c(S), \mu_i \beta b(R) + c(S) + c(P)\}
 \end{aligned}$$

Diese Formel  $v_i$  repräsentiert den Nutzenwert in einer spezifischen Runde. Ausgehend von dieser Formel, kann der erwartete Nutzenwert für einen Spieler ausgehend von einer beliebigen Runde  $t$  berechnet werden (vgl. Abschnitt 2.2.6):

$$v_i^t = \max\{0, c(P), \mu_i \beta b(R) + c(S), \mu_i \beta b(R) + c(S) + c(P)\} + \beta v_i^{t+1}$$

Der Nutzenwert in der Runde  $t$  ist damit der Nutzenwert aus der aktuellen Runde für die Wahl einer Strategie  $s_i$  aus  $S_i$  plus der abgezinste Nutzenwert aus den folgenden Runden. Die Auszahlung für den Erhalt eines Anfrageergebnisses in Runde  $t$  ist dabei nicht die Auszahlung für die in Runde  $t$  abgesetzte Anfrage, sondern für eine Anfrage, die in einer vorhergehenden Runde abgesetzt wurde. Im Modell wird dies so abgebildet, dass ein Spieler mehrere Runden wartet, bis er schließlich ein Anfrageergebnis erhält. Daneben beschreibt  $\mu_i$  die Wahrscheinlichkeit, die ein Spieler dem Erhalten eines Anfrageergebnisses zuordnet. Wählt ein Spieler eine stationäre Strategie, d.h. spielt er während allen Runden dieselbe Strategie, so maximiert er nur die Auszahlung pro Runde.

Bei der Bestimmung von Gleichgewichten wird im Folgenden zunächst von einer linearen Nutzenfunktion aller Teilnehmer ausgegangen, d.h. der Wert  $v_i^t$  beschreibt den Nutzen eines Spielers. In Abschnitt 4.1.2 wird der Wert  $v_i^t$  durch unterschiedliche nicht lineare Nutzenfunktionen der Spieler ersetzt. Der Wert der Strategie Altruismus ist offensichtlich negativ und damit von der Strategie Verlassen dominiert. Diese Strategie wird daher im Weiteren nicht berücksichtigt. Auch Strategie Kooperation scheint von der Strategie Freifahren dominiert zu werden. Dies gilt aber nur, wenn die Spieler ihre Strategie nicht an die Strategien anderer Spieler anpassen, wenn also  $\mu_i$  konstant ist. Diese Annahme gilt nicht, wenn die Spieler auf Freifahrerverhalten reagieren können. In Abschnitt 4.1.2 wird näher auf diesen Zusammenhang eingegangen.

## 4.1 Bestimmung der Gleichgewichte

Im Folgenden sollen die Gleichgewichte für das hier eingeführte Modell bestimmt werden. Dabei wird auf die unterschiedlichen Gleichgewichtskonzepte, teilspielperfektes Gleichgewicht (vgl. Abschnitt 2.2.4) und stationäres Gleichgewichts (vgl. Abschnitt 2.2.6), eingegangen.

### 4.1.1 Teilspielperfektes Gleichgewicht

Da die Spieler nur Anfragen bearbeiten können, die sie in vorangegangenen Runden empfangen haben, und Anfrageergebnisse nicht in der Runde empfangen werden können, in der sie abgeschickt wurden, ist es in Spielen endlicher Länge rational, in der letzten Runde der Strategie Verlassen zu folgen. Durch Bestimmung eines teilspielperfekten Gleichgewichts mit Hilfe der Rückwärtsinduktion (vgl. Abschnitt 2.2.4) kann gezeigt werden, dass dies auch für alle vorhergehenden Runden gilt.

Die in Kapitel 3 beschriebenen verhaltensökonomische Experimente zeigen, dass sich Teilnehmer auch in Spielen endlicher Länge die meiste Zeit so verhalten, als würde das Spiel unendlich lange dauern - solange das Ende nicht in den nächsten Runden liegt [SeS86]. Daher wird im Folgenden das stationäre Gleichgewicht (vgl. Abschnitt 2.2.6) für ein Spiel mit unendlich vielen Runden  $T = \{1, \dots\}$  und Diskontierung bestimmt.

### 4.1.2 Stationäres Gleichgewicht

Bei der Bestimmung stationärer Gleichgewichte wird das Verhalten der Spieler unabhängig von der aktuellen Runde betrachtet. Aus Sicht des Spielers ist die Zukunft des Spiels immer identisch, unabhängig davon ob er sich in Runde 1, 1000 oder 10000 befindet. Im Folgenden werden also Strategien unabhängig von der gespielten Runde betrachtet.



Basierend auf der Gleichung  $v_i^t$  lässt sich das stationäre Gleichgewicht des Spiels bestimmen und charakterisieren [HeV02]. Aus formaler Sicht ändert sich die Auszahlung über die Zeit nicht. Da ein stationäres Gleichgewicht noch immer ein Nash-Gleichgewicht ist, wird es erreicht, indem jeder Spieler die Strategie wählt, welche die beste Antwort auf die Strategien der anderen ist. Jeder rationale Spieler wählt die Aktion, welche die Gleichung  $v_i^t$ , abhängig von  $\beta$  und  $\mu_i$ , maximiert.

Ein stationäres Gleichgewicht eines Spiels besteht gemäß Abschnitt 2.2.6 aus den Überzeugungen  $\mu_i^*$  und Strategieentscheidungen  $s_i^* \in S_i$  (für  $i = 1, \dots, n$ ), so dass

- $s_i^*$  gegeben die Überzeugung  $\mu_i^*$  optimal ist, und
- $\mu_i^*$  konsistent mit den Strategieentscheidungen aller Teilnehmer  $s_j^*$  für  $j \neq i$  ist.

Die Aussage, dass  $\mu_i^*$  konsistent mit allen Strategieentscheidungen  $s_j^*$  ist, trägt dem Aspekt Rechnung, dass die Spieler ihre Überzeugung an die eigenen Beobachtungen anpassen. Spielen beispielsweise alle Spieler die Strategie Verlassen, wird die Wahrscheinlichkeitseinschätzung des einzelnen Spielers dies widerspiegeln: In diesem Fall ist die Überzeugung  $\mu_i^*$  nahe 0. Der Teilnehmer kann nicht damit rechnen, dass seine Anfragen beantwortet werden.

**Alle Spieler verlassen das System:** Ein Gleichgewicht wird erreicht, wenn alle Spieler der Strategie Verlassen folgen. In diesem Fall gilt  $\mu_i^* = 0$ , da keine Anfrage beantwortet wird und die Spieler dies beobachten können. Damit ist der Nutzenwert jedes einzelnen Spielers

$$\begin{aligned} v_i^t &= \max\{0, 0\beta b(R)+c(S), 0\beta b(R)+c(S)+c(P)\} + \beta v_i^{t+1} \\ &= \max\{0, c(S), c(S)+c(P)\} + \beta v_i^{t+1} \\ &= 0 + \beta v_i^{t+1}. \end{aligned}$$

Da Strategiewahl im stationären Gleichgewicht zeitunabhängig ist, gilt auch für alle Folgeperioden  $v_i^{t+u} = 0$ , mit  $u \in \{1, \dots\}$  und damit:

$$v_i^t = 0$$

Folglich ist die Auszahlung jedes einzelnen Spielers und damit des gesamten Systems 0. D.h. für alle möglichen Parameterwerte (alle möglichen Werte für  $\beta$ ) ist das Gleichgewicht, indem kein Spieler eine Anfrage abschickt und niemand Anfragen bearbeitet, ein mögliches Ergebnis.

Um weitere Gleichgewichte zu identifizieren, werden im Folgenden die Nutzenfunktionen der Spieler näher betrachtet. Ein Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn alle Spieler jede Runde dieselbe Strategie spielen und sie ihren Nutzen nicht erhöhen können, indem sie die Strategie wechseln. Es wird also für jeden Spieler der Wert  $v_i^t$  näher betrachtet.

**Alle Spieler sind Freifahrer:** Ein System, indem alle Spieler Freifahrerverhalten zeigen, ist nicht in einem Gleichgewicht. Jeder rationale Spieler  $i$  wählt die Strategie, die seinen Nutzenwert  $v_i^t$  maximiert. Auf den ersten Blick dominiert damit die Strategie Freifahren die Strategie Kooperation, da  $c_i(P)$  negativ ist. Diese erste Sicht ist aber nicht richtig: Es ist nicht möglich für jede Menge an Spielern, welche der Strategie Freifahren folgen, Überzeugungen  $\mu_i^*$  zu finden, die konsistent mit der beobachteten Anzahl Spieler mit dieser Strategie sind. Wählen beispiels-

weise alle Spieler die Strategie Freifahren, so gilt  $\mu_i^* = 0$  für alle Spieler  $j \neq i$ . In diesem Fall dominiert die Strategie Verlassen die Strategie Freifahren.

Im Folgenden wird angenommen, dass alle Spieler dieselbe lineare Nutzenfunktion besitzen und dass die Gleichgewichte im symmetrisch sind. D.h. ist eine Strategiewahl die Beste für einen bestimmten Spieler, so ist sie auch die beste Wahl für alle anderen Spieler.

**Volle Kooperation:** Ein anderes Gleichgewicht wird erreicht, wenn alle Spieler voll kooperieren. In diesem Fall gilt  $\mu_i^* = 1$  für alle  $i$ .

Damit jeder Spieler einen Anreiz hat der Strategie Kooperation zu folgen, muss diese Strategie die beiden anderen Strategiealternativen, Strategie Verlassen und Strategie Freifahren, dominieren. Damit die Strategie Kooperation die Strategie Verlassen dominiert, muss die Auszahlung des Spielers  $i$  positiv sein. Es muss also gelten:

$$\beta b(R) + c(S) + c(P) > 0$$

Damit gilt

$$|\beta b(R)| > |c(S) + c(P)|$$

Die abgezinste Auszahlung für das Erhalten eines Anfrageergebnisses muss folglich betragsmäßig größer sein als die Kosten für die Teilnahme am System.

Wäre es für einen Spieler optimal die Strategie Freifahren zu wählen, so würde dies für alle Spieler gelten. Dies würde zu negativer Auszahlung der Spieler und damit zu  $\mu_i^* = 0$  führen. Da die Auszahlung für Kooperation höher als 0 ist, ist die Strategie Kooperation eine Gleichgewichtsstrategie.

Die Spieler wählen in diesem Gleichgewicht Schwellwertstrategien. Ein Gleichgewicht wird erreicht, wenn die Kosten gering sind und die Auszahlung und der Abzinsungsfaktor  $\beta$  ausreichend groß sind.

**Mix aus Kooperieren und Freifahren:** Besitzen die Spieler unterschiedliche Nutzenfunktionen, so kann es passieren, dass sie unterschiedliche Strategien wählen. Für eine Analyse dieses Falls werden Spieler nicht betrachtet, die der Strategie Verlassen folgen: Spieler, die das Peer-to-Peer System verlassen haben, besitzen keinen Einfluss auf die Auszahlung der anderen Spieler in den nachfolgenden Runden. Die einzige verbleibende Kombination von Strategien ist eine Kombination aus der Strategie Freifahren und der Strategie Kooperieren.

Es existieren zwei unterschiedliche Typen von Spielern mit unterschiedlichen Nutzenfunktion  $u_i$ . Ein Typ, die Freifahrer, besitzt die Nutzenfunktion  $u_{ff}$ . Der andere Typ, die Kooperierer, besitzt die Nutzenfunktion  $u_{co}$ . Die Auszahlungen  $b(R)$ ,  $c(S)$  und  $c(P)$  werden nun durch die Nutzen der Auszahlung  $u_i(b(R))$ ,  $u_i(c(S))$  und  $u_i(c(P))$  ersetzt. Damit ändert sich die Gleichung  $v_i^t$  zu

$$v_i^t = \max\{0, u_i(c(P)), \mu_i \beta u_i(b(R)) + u_i(c(S)), \mu_i \beta u_i(b(R)) + u_i(c(S)) + u_i(c(P))\} + \beta v_i^{t+1}$$

Gleichgewichte existieren nun, wenn einige Spieler  $j = 1, \dots, l$  freifahren und einige Spieler  $k = l+1, \dots, n$  kooperieren. Im stationären Gleichgewicht gilt  $\mu_i^* = (n-l)/n$ .

Im Gleichgewicht müssen zwei Gleichungen erfüllt sein: Zum Einen muss es für Freifahrer lohnender sein im System zu bleiben, als das System zu verlassen. Es muss also

$$a) (n-1)/n \beta u_{fr}(b(R)) + u_{fr}(c(S)) > 0$$

gelten. Weiterhin darf sich Kooperation für den Freifahrer nicht lohnen. Es muss also

$$b) (n-1)/n \beta u_{fr}(b(R)) + u_{fr}(c(S)) > \beta u_{fr}(b(R)) + u_{fr}(c(S)) + u_{fr}(c(P))$$

erfüllt sein. Wäre für den Freifahrer Kooperation lohnend, so würde er kooperieren. In diesem Fall würde  $\mu_i = 1$  gelten und die rechte Seite der Gleichung entspräche der Auszahlung des Spielers. Beide Bedingungen können für unterschiedliche Kombinationen aus Parametern und Nutzenfunktionen erfüllt sein.

Für Spieler, die kooperieren, ähnelt die Situation der Situation im Gleichgewicht indem alle Spieler kooperieren mit  $\mu_i^* = (n-1)/n$ . Gemäß der beschriebenen Argumente muss für die Spieler

$$c) (n-1)/n \beta u_{co}(b(R)) + u_{co}(c(S)) + u_{co}(c(P)) > 0$$

gelten. Da sich die Nutzenfunktionen der Freifahrer von den Nutzenfunktionen der kooperierenden Spieler unterscheiden, können die hier beschriebenen Ungleichungen für die gleichen Parameter  $\beta$ ,  $b(R)$ ,  $c(S)$ ,  $c(P)$  erfüllt werden.

*Beispiel:* Sei ein Peer-to-Peer System gegeben, in dem der Erlös für das Erhalten eines Anfrageergebnisses  $b(R)$  gleich 100 ist, die Kosten für das Abschicken von Anfragen  $c(S)$  seien -2 und die Kosten für das Bearbeiten von Anfragen  $c(P)$  seien -5. Der Abzinsungsfaktor für alle Spieler  $\beta$  sei 0,9. Sei ein Teil der Spieler Freifahrer und der andere Teil kooperierende Peers. Alle Spieler besitzen dieselben kostenabhängigen Nutzen, d.h.  $u_{co}(c(S)) = u_{fr}(c(S)) = -2$  und  $u_{co}(c(P)) = u_{fr}(c(P)) = -5$ . Sie sehen sich jedoch unterschiedlichem erlösabhängigem Nutzen gegenüber: Kooperierende Spieler besitzen hohen Nutzen ( $u_{co}(b(R)) = 100$ ) und Freifahrer besitzen geringen Nutzen ( $u_{fr}(b(R)) = 6$ ) für das Erhalten von Anfrageergebnissen.

Für Freifahrer ist Ungleichung a) erfüllt, wenn  $(n-1)/n \cdot 0,9 \cdot 6 - 2 > 0,9 \cdot 6 - 2 - 5$ . Dies gilt für  $(n-1)/n > 0,4/5,4$ . Bedingung b) führt zu  $(n-1)/n \cdot 0,9 \cdot 6 - 2 > 0$ .  $(n-1)/n$  muss also größer als  $2/5,4$  sein. Bei dieser Kombination von Nutzenwerten lohnt es für Freifahrer nicht zu kooperieren, da ihr Nutzen beim Freifahren kleiner 0 ist. Für Spieler, die kooperieren, ist die Ungleichung c) erfüllt, wenn  $(n-1)/n$  größer als  $7/90$  ist. Sie kooperieren, wenn mindestens  $7/90$  aller Spieler kooperieren. Da  $2/5,4$  größer als  $7/90$  und  $0,4/5,4$  ist, muss für das gesamte System im Gleichgewicht  $(n-1)/n > 2/5,4 \approx 37\%$  erfüllt sein. Die beschriebene Kombination aus Kosten und Nutzen führt also zu einem Gleichgewicht, wenn mindestens 37% aller Spieler kooperatives Verhalten zeigen. ■

Auch die hier beschriebenen Strategien sind Schwellwertstrategien. Wie die beschriebene Analyse zeigt, werden in Peer-to-Peer Systemen ohne Anreizmechanismen mehrere Gleichgewichte erreicht, in welchen Freifahrerverhalten toleriert wird. Die Heterogenität der Spieler wurde im Modell durch unterschiedliche Nutzenfunktionen modelliert. Die Gleichungen würden aber zu denselben Gleichgewichten führen, wenn anstelle der Nutzenfunktionen der Teilnehmer die Erlöse und Kosten der Teilnehmer modifiziert würden. Formal ist es nicht bedeutend, ob sich zwischen den Spielern die Kosten und Erlöse oder die Nutzenfunktionen unterscheiden.

## 4.2 Gleichgewichte in Systemen mit Indirekter Partner Interaktion

Interagieren die Spieler nur mit einem Teil der anderen Spieler und können diese identifizieren, so können sie mit jedem von ihnen eine eigene Strategie spielen. D.h. ein Spieler kann mit dem

einen Kontakt kooperieren, während er einem anderen weder Anfragen schickt, noch dessen Anfragen bearbeitet. Dabei leiten die Spieler Überzeugungen bezüglich der anderen Spieler  $\mu_i^j$  mit  $j \neq i$  ab, statt eine gemeinsame Überzeugung bezüglich des gesamten Systems  $\mu_i$  zu bilden. Spieler  $i$  kann dann für jeden Spieler  $j$  eine andere Strategie wählen. Spieler  $i$  spielt also je ein Spiel mit jedem seiner Kontakte. Dieses Spiel wird als binäres Spiel bezeichnet, da nur zwei Spieler an dem Spiel teilnehmen. Die in Abschnitt 4.1 bestimmten Gleichgewichte gelten auch für diesen Fall, jedoch wird  $\mu_i$  nun durch  $\mu_i^j$  ersetzt. Die Gleichgewichte für jede binäre Beziehung bleiben dieselben. In jeder binären Beziehung nutzen die Spieler Schwellwertstrategien, d.h. sie verhalten sich reziprok. Die Schwellwerte beider Spieler müssen nicht gleich sein, da sich die Nutzenfunktionen beider Spieler unterscheiden können.

Die Unterscheidung zwischen den Spielern hat einen Vorteil: Die Strategie Freifahren lohnt sich nicht mehr. Im Gleichgewicht muss die Überzeugung des anderen Spielers mit dem Verhalten, das er beobachtet, konsistent sein. Glaubt ein Spieler, dass der andere Spieler keine Anfragen bearbeitet, so wird er die Strategie Verlassen gegenüber diesem Spieler wählen. Dies wird dazu führen, dass auch der andere ihm gegenüber diese Strategie wählt und sie sich weder Anfragen schicken noch Anfragen für einander bearbeiten. Damit ist ein Gleichgewicht, indem ein Teil der Spieler kooperiert, während ein Teil der übrigen Spieler Freifahrerverhalten zeigt nicht mehr möglich.

### **4.3 Effizienz**

Die Effizienz des Systems ist von der Anzahl der Freifahrer abhängig. Da im System viele verschiedene Kombinationen von Freifahrern und kooperativen Spielern möglich sind, sind verschiedene Grade von Effizienz zwischen 0% und 100% möglich. Sobald einzelne Spieler andere Spieler identifizieren können (siehe Abschnitt 4.2) ist ein hoher Grad an Effizienz garantiert. Diese Situation ändert sich nicht, wenn ein Spieler mehr verdient als ein anderer. Aufgrund der Reziprozität der Schwellwertstrategien sollte kein Spieler von der Strategie Kooperation abweichen.

### **4.4 Übertragung auf strukturierte Peer-to-Peer Systeme**

Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, haben strukturierte Peer-to-Peer Systeme die Eigenschaften von Indirekter Partner Interaktion. Gemäß dem in diesem Kapitel entwickelten Modell sind damit zwei Gleichgewichte möglich: In einem Gleichgewicht kooperieren alle Teilnehmer, während in einem anderen Gleichgewicht das System keine Teilnehmer besitzt. Im ersten Gleichgewicht werden alle Anfragen beantwortet. Im zweiten Gleichgewicht partizipieren keine Teilnehmer am System. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus den verhaltensökonomischen Experimenten. Hier spielten die Teilnehmer stets das Gleichgewicht mit voller Kooperation. Damit ist es für alle Teilnehmer rational Schwellwertstrategien zu spielen, so lange sie vom System profitieren können. Die Verhaltensökonomischen Experimente zeigten, dass die Teilnehmer dies auch tun. D.h. sie kooperierten mit den anderen Teilnehmern und folgten nicht der Strategie Freifahrer. Das Gleichgewicht, in welchem keine Anfragen bearbeitet werden, wurde nicht erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Teilnehmer zu Beginn der Untersuchungen eine Startphase spielten: Sie waren zu Beginn der Untersuchungen sehr kooperativ. So wurde das Gleichgewicht mit voller Kooperation erreicht und nicht mehr verlassen.

## 5 Simulationen

Im Folgenden werden Simulationen genutzt um zu prüfen, wie sich die In Kapitel 3 beobachteten Strategien in Systemen mit mehr als sechs Teilnehmern verhalten. Dabei wird auch darauf eingegangen, ob die vom spieltheoretischen Modell in Kapitel 4 vorhergesagten Gleichgewichte erreicht werden.

In den verhaltensökonomischen Experimenten konnten neben den in Kapitel 3 beschriebenen strategischen Eigenschaften noch weitere Eigenschaften beobachtet werden. Diese wurden jedoch entweder nur von einer Minderheit der Teilnehmer genutzt oder waren nicht Teil der Gleichgewichtsstrategien und sind deshalb nicht Teil des formalen Modells aus Kapitel 4. So spielten beispielsweise mehrere Teilnehmer eine Startphase. Sie zeigten also verstärkte Kooperation gegenüber den Teilnehmern mit welchen sie zu Beginn des Experiments interagierten. Die Teilnehmer nutzten auch unterschiedliche Strategien beim Weiterleiten oder Beantworten von Anfragen. So setzten beispielsweise einige Teilnehmer andere Schwellwerte beim Beantworten von Anfragen ein als beim Weiterleiten von Anfragen. Zusätzlich wurden unterschiedliche Strategien bei der Wahl des nächsten Weiterleiters genutzt:

- *Nächster Weiterleiter (CF)*: Der Teilnehmer wählt den Teilnehmer als Empfänger seiner Nachrichten, der dem Anfragepunkt am nächsten liegt.
- *Nur Vertrauenswürdige Weiterleiter (ORF)*: Der Teilnehmer leitet seine Anfrage an den nächsten, vertrauenswürdigen Knoten weiter. Besitzt er keinen vertrauenswürdigen Kontakt zur Weiterleitung, wird die Anfrage gelöscht.
- *Nächster Vertrauenswürdiger Weiterleiter (CRF)*: Der Teilnehmer leitet seine Anfrage an den nächsten, vertrauenswürdigen Knoten weiter. Besitzt er keinen solchen Kontakt, der für die Weiterleitung in Frage kommt, so wird an den Knoten weitergeleitet, der dem Anfragepunkt am nächsten liegt.
- *Beliebiger Vertrauenswürdiger Weiterleiter (ARF)*: Der Teilnehmer leitet seine Anfrage an den nächsten, vertrauenswürdigen Knoten weiter. Besitzt er keinen solchen Kontakt, der möglicher Adressat der Anfrage ist, so wird die Anfrage an den Knoten weitergeleitet, der den höchsten Anteil von Anfragen bearbeitet hat.

Mit Hilfe von Simulationen, können auch diese Strategien, die im formalen Modell keine Beachtung fanden, untersucht werden. Außerdem erlaubt die Untersuchung des Systems mittels Simulationen, wie sich das System außerhalb der Gleichgewichtszustände verhält. So kann charakterisiert werden, unter welchen Voraussetzungen die beiden Gleichgewichte erreicht werden.

### 5.1 Hypothesen

Das in Kapitel 4 beschriebene formale Modell beinhaltet nicht alle Strategieeigenschaften, die in den verhaltensökonomischen Experimenten beobachtet wurden, sondern nur die Strategien, welchen die Mehrheit der Teilnehmer folgte. So werden darin beispielsweise keine Strategien betrachtet, die nicht von einem Schwellwert abhängen. Auch die Startphase kann nicht betrachtet werden, da das Modell ausschließlich Systeme im Gleichgewicht untersucht. Durch verstärkte Kooperation in den ersten Runden nachdem ein Knoten das System betritt, lässt ein Knoten die Kontakte glauben, dass er sehr kooperativ ist. Dadurch neigen die Kontakte dazu, ihm gegenüber kooperativeres Verhalten zu zeigen. Dies macht es wahrscheinlich, dass ein Zustand

erreicht wird, indem beide Knoten kooperieren. Der Einsatz einer Startphase erhöht somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein effizientes Gleichgewicht erreicht wird. Dennoch kann das spieltheoretische Modell dies nicht vorhersagen: Mit Spieltheorie kann nicht bestimmt werden, wie das entsprechende Gleichgewicht erreicht wurde. So lässt sich beispielsweise nicht sagen, ob es von einem beliebigen initialen Strategiemix erreicht wird, oder ob Strategiemixe existieren, die das Erreichen eines bestimmten Gleichgewichts wahrscheinlicher machen. Danach wird untersucht, wie stabil die Gleichgewichtsstrategien sind. Es wird also untersucht, wie viele Knoten von ihrer Strategie abweichen können ohne dass es zum Zusammenbruch des Systems kommt. Auch diese Frage lässt sich nicht mit Hilfe des spieltheoretischen Modells untersuchen. Um diese Fragen zu beantworten, werden im Folgenden unterschiedliche strategische Aspekte zu Strategien kombiniert. Mit Hilfe der so formulierten Strategien werden dann die Eigenschaften der Gleichgewichte untersucht. In diesem Abschnitt werden für die entsprechenden Analysen zunächst Hypothesen formuliert, die dann in Abschnitt 5.3 validiert werden.

Bei der Analyse wird zwischen zwei Aspekten unterschieden: Zum Einen werden die Strategien identifiziert, welche in den beiden Gleichgewichten genutzt werden. Zum Anderen wird die Stabilität des Strategiemixes, der das effiziente Gleichgewicht beschreibt, untersucht, indem neue Strategien in das System eingeführt werden. Dabei ist der zweite Aspekt der interessantere. Hierbei wird analysiert, ob ein Gleichgewicht selbst bei der Fluktuation von Knoten weiter besteht. Jedoch müssen vor dieser Analyse die Strategien identifiziert werden, welche im effizienten Gleichgewicht benutzt werden. Ohne diese Strategien ist das Analysieren des Einflusses von Strategieänderungen auf das Gleichgewicht nicht möglich.

### 5.1.1 Bestätigung der Gleichgewichte

Das spieltheoretische Modell sagt für strukturierte Peer-to-Peer Systeme zwei Gleichgewichte voraus: Im ineffizienten Gleichgewicht verschickt keiner der Knoten Anfragen. Im effizienten Gleichgewicht bearbeitet jeder Knoten Anfragen für andere Knoten. Gemäß der Spieltheorie ändern die Knoten ihre Strategien bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Deshalb wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Knoten in den Simulationen solange ändern, bis das System ein Gleichgewicht erreicht. Daraus leitet sich die erste Hypothese ab:

*Hypothese Existenz der Gleichgewichte:* In strukturierten Peer-to-Peer Systemen wird entweder das effiziente oder ineffiziente Gleichgewicht erreicht, wenn alle Knoten rationale Nutzenmaximierer sind.

Die Untersuchung, ob ein System tatsächlich ein Gleichgewicht erreicht, ist wichtig. Werden die theoretisch vorausgesagten Gleichgewichte nicht erreicht, so ist die Nützlichkeit des formalen Modells beschränkt. Das Modell würde ausschließlich Szenarien beschreiben, die das System selbst nie erreicht. Die experimentellen Ergebnisse werden zeigen, dass beide Gleichgewichte erreicht werden. Deshalb wird in einem nächsten Schritt untersucht, wie die Wahrscheinlichkeit erhöht werden kann, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird.

Mit Hilfe der Simulationen wird nicht der Erfolg einer oder weniger gegebener Strategien untersucht, sondern der Strategiemix, der sich herausentwickelt, wenn alle Knoten ihre Strategie frei wählen können. Eine solche Analyse ist realistischer als die traditionelle Herangehensweise, bei der nur eine ausgewählte Menge an Strategien miteinander verglichen wird: Menschen können nicht gezwungen werden einer vorgegebenen Strategie zu folgen. Wie das formale Modell voraussagt, hängt das Ergebnis des Spiels von den Überzeugungen der Knoten bezüglich dem Verhalten der anderen ab. In verteilten, koordinatorfreien Systemen können solche Überzeu-

gungen nur auf der Basis der Beobachtungen des Verhaltens der anderen Knoten abgeleitet werden. Darin begründet sich die nächste Hypothese:

*Hypothese Hohe Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs:* Ein System, bestehend aus Strategien, die aus unterschiedlichen Strategieaspekten zusammengesetzt sind, toleriert weniger unkooperative Knoten als ein System, indem eine bestimmte feste Strategie mit Angriffen konfrontiert wird.

Hartkodierte Strategien, also feste, vom Systemdesigner vorgegebene Strategien, können von der Benutzung von Feedback oder von Signalisierungsstrategien, also dem identifizieren anderer Knoten durch Einsatz bestimmter Strategien, profitieren. Dennoch haben Feedback und Signalisierungsstrategien Nachteile in strukturierten Peer-to-Peer Systemen: Um zwischen ehrlichem und unehrlichem Feedback unterscheiden zu können, muss der Empfänger die Glaubwürdigkeit des Absender mitberücksichtigen. Dafür muss er die Glaubwürdigkeit mittels seiner eigenen Beobachtungen abschätzen. Jeder Knoten muss also eine Überzeugung bezüglich des Verhaltens des anderen Knotens entwickeln. Dafür werden zusätzliche Beobachtungen des Verhaltens des Absenders nötig. Durch Signalisierungsstrategien, beispielsweise dem durchführen kostenintensiver Aufgaben um die Arbeitsbereitschaft zu signalisieren, so genannte Arbeitsbeweise, zeigt ein Knoten seine Bereitschaft sich kooperativ zu verhalten [BuB04b, RRM03]. Dennoch funktioniert dies nur, wenn die Signalisierungsstrategie hartkodiert ist. Im Fall von Arbeitsbeweisen muss beispielsweise jeder kooperative Knoten diese anfordern und bearbeiten, während ein unkooperativer Knoten diese nicht bearbeitet.

Wie die verhaltensökonomischen Experimente in Kapitel 3 zeigen, kontrollieren die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen verschiedene Strategieeigenschaften, wie beispielsweise unterschiedliche Schwellwerte. Der Einfluss der Strategieeigenschaften auf das Ergebnis des Systems ist unklar. Deshalb wird mit den folgenden Hypothesen untersucht welche Strategieeigenschaften (siehe Abschnitt 5.2 für eine vollständige Übersicht dieser Eigenschaften) die Wahrscheinlichkeit erhöhen, das effiziente Gleichgewicht zu erreichen.

*Hypothese Startphase:* Erhöhte Kooperativität der Knoten in der Startphase führt zu erhöhter Kooperativität in späteren Runden. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird.

Analog zur Startphase ist die Wahl des nächsten Weiterleiters für den egoistischen Nutzenmaximierer selbst nicht wichtig: Ein Knoten profitiert nicht vom Weiterleiten von Anfragen über einen seiner Kontakte, wenn er keinen dieser Knoten für kooperativ hält. Dennoch ist es wahrscheinlicher, dass ein System das effiziente Gleichgewicht erreicht, wenn diese Anfragen weitergeleitet werden.

*Hypothese Wahl des Weiterleiters:* Nutzen die Knoten ausschließlich Weiterleitungsstrategien, die keine Anfragen löschen, also die Strategien CF, CRF und ARF, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird.

Diese Hypothese ist ebenfalls bedeutungsvoll. Während das Löschen von Nachrichten die Effizienz im Gleichgewicht verringert, ist der Effekt des Löschens von Nachrichten in einem System, das noch kein Gleichgewicht erreicht hat, unklar: In solchen Systemen haben Knoten, die von unkooperativen Knoten umringt sind, eine höhere Auszahlung, wenn sie keine Anfragen abschicken: All ihre Nachrichten werden gelöscht.

### 5.1.2 Stabilität der Gleichgewichte

Die bisher beschriebenen Hypothesen konzentrieren sich auf Bedingungen, unter welchen Gleichgewichte erreicht werden. Die folgenden Hypothesen beschäftigen sich mit der Stabilität des effizienten Gleichgewichts, d.h. dem Gleichgewicht, in dem alle Knoten Anfragen bearbeiten. Bei diesen Hypothesen liegt der Fokus auf dem Effekt neu generierter Strategien.

*Hypothese Einfluss zufälliger Strategien:* Knoten, die zu neu generierten Strategien wechseln, verringern die Stabilität des Systems verglichen mit Knoten, die nur zu den Strategien ihrer Kontakte wechseln.

Im Folgenden wird der Einfluss exogener Parameter, also von Parametern, die der Knoten selbst nicht beeinflussen kann, auf die Stabilität des Gleichgewichts untersucht. Zwei solche Parameter existieren: Zum Einen die Anzahl der Weiterleitungen einer Anfrage und zum Anderen das Verhältnis zwischen den Kosten und dem Erlös pro abgeschickter Nachricht.

Gemäß des spieltheoretischen Modells beeinflusst die Anzahl der Weiterleitungen das erreichte Gleichgewicht. Je mehr Weiterleitungen nötig sind, umso geringer ist Überzeugung der einzelnen Knoten, dass ihre Gegenüber kooperativ sind. Folglich ist es wahrscheinlicher, dass ein Knoten defektiert. Auf dieser Basis wird die folgende Hypothese abgeleitet:

*Hypothese Einfluss der Zahl der Weiterleitungen:* Die Wahrscheinlichkeit, das effiziente Gleichgewicht zu erreichen, sinkt mit der Anzahl der Weiterleitungen.

Diese Untersuchung ist interessant: Während das formale Modell andeutet, dass mit steigender Anzahl von Weiterleitungen weniger Freifahrer im System toleriert werden. Da der erwartete Nutzen durch das Abschicken von Anfragen reduziert wird, gibt dies keine Information wie stabil das erreichte Gleichgewicht ist. D.h., es gibt nicht an, wie viele Knoten zu Freifahrerverhalten wechseln können bis das System das ineffiziente Gleichgewicht erreicht.

Ähnliches gilt für das Verhältnis von Kosten zum Erlös der Knoten. Der Einfluss dieses Verhältnisses wird untersucht, indem die Höhe des Erlöses geändert wird. Je höher der Erlös eines Knotens, umso höher ist der Nenner der Schwellwertbedingung ( $\beta b_k(R)$ ) im formalen Modell. Durch Erhöhen des Nenners sinkt die rechte Seite der Ungleichungen VI und VII, also der Schwellwertbedingung im formalen Modell (siehe Abschnitt 4.1.2). Gegeben, dass ein Knoten seine Überzeugungen nicht anpasst, ist es nun wahrscheinlicher, dass ein Knoten defektiert: Die Strategie Kooperation ist nun nicht mehr lohnenswert, während es die Strategie Freifahren noch ist. Daraus leitet sich folgende Hypothese ab:

*Hypothese Einfluss der Erlöse:* Je höher die Erlöse, umso wahrscheinlicher ist es, dass die Knoten miteinander kooperieren.

Die letzten zwei Hypothesen beschäftigen sich mit allen Parametern, die der Knoten selbst direkt beeinflussen kann. Zwischen diesen Parametern und allen anderen Parameter besteht eine Korrelation. Beispielsweise ist die Anzahl der Knoten im System zur mittleren Anzahl der Weiterleitungen einer Nachricht korreliert. Weder die verhaltensökonomischen Experimente noch das spieltheoretische Modell geben Anlass zur Vermutung, dass zusätzliche Parameter, so wie Fairnessüberlegungen die Strategien beeinflussen. Die beschriebenen Hypothesen repräsentieren alle Parameter, die gemäß dem spieltheoretischen Modell und der verhaltensökonomischen Experimente die Strategien beeinflussen. Ein anderer Parameter, der dies illustriert, sind die Kosten für das Bearbeiten von Anfragen. Dieser Parameter ist nicht explizit Teil der Hypothe-



sen, dennoch lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Kosten in den Simulationen untersuchen, indem die Erlöse modifiziert werden. Ähnlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Anzahl der Knoten im System und der Anzahl der Weiterleitungen. Durch Erhöhung der Anzahl der Knoten steigt auch die Anzahl der Weiterleitungen.

Bei der Untersuchung der hier beschriebenen Hypothesen in Abschnitt 5.3, werden nicht nur die Hypothesen validiert, sondern auch diskutiert. So wird beispielsweise bei der Analyse der Existenz der Gleichgewichte darauf eingegangen, welche Strategien zu diesen Gleichgewichten führen.

## 5.2 Simulationsentwurf

In diesem Abschnitt wird auf den Experimentaufbau eingegangen, mit dem die Hypothesen evaluiert werden. Hierfür wurde ein inhaltsadressierbares Netz realisiert. Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wie die Strategien im System repräsentiert werden. Dann wird auf das Vorgehen während der Simulationen zur Anpassung des Strategiemixes eingegangen, bevor die Vorteile dieses Ansatzes diskutiert werden.

### 5.2.1 Strategievektor

Die Werte verschiedener Strategieeigenschaften legen die Strategie eines Knotens fest: Diese Eigenschaften bestimmen, unter welchen Bedingungen ein Knoten antwortet, weiterleitet oder Anfragen abschickt. Die Simulationsumgebung erlaubt es jedem Knoten im System eine eigene Strategie zu nutzen. Dieser Ansatz unterscheidet sich fundamental von existierenden Analysen strukturierter Peer-to-Peer Systeme: Es sind nicht nur zwei oder drei verschiedene Strategien für die Knoten erlaubt, sondern Kombinationen verschiedener Strategieeigenschaften. Für die simulierten Knoten werden die Strategien als Bitvektor, einem so genannten Strategievektor, repräsentiert. Jedes Bit des Strategievektors repräsentiert eine bestimmte Strategieeigenschaft. Ein Bit definiert beispielsweise, ob die Strategie nach dem Eintritt in das System kooperativ ist, ein anderes legt fest, wie Anfragen weitergeleitet werden. Dieser Abschnitt beschreibt alle so modellierten Eigenschaften.

Der Strategievektor basiert auf den Strategien, die in den Verhaltensexperimenten beobachtet wurden. Lediglich sehr spezifische Merkmale der Strategien wurden nicht berücksichtigt, auf alle anderen Strategieeigenschaften, die Menschen benutzten, wurde eingegangen. Beispielsweise nutzten die Knoten verschiedene Schwellwerte. In den Strategievektoren wird dies durch acht unterschiedliche Schwellwerte abgebildet. Dabei resultiert der Wert acht aus der Repräsentation als Bitvektor: Vier unterschiedliche Werte (zwei Bit) hätten neben bedingungsloser Kooperation und Freifahrerverhalten nur zwei andere Werte erlaubt. Vier Bit auf der anderen Seite hätten 16 unterschiedliche Schwellwerte erlaubt: Dies führt dazu, dass viel Zeit verstrich, ehe das System zu einem bestimmten Strategiemix konvergiert.

Jeder Strategievektor besteht aus den folgenden Komponenten:

- *Startphase (SP, 1 Bit)*. Die Strategie konnte entweder eine Startphase nutzen oder nicht. Die Startphase dauerte 100 Runden.
- *Weiterleitungsschwellwert (FC, 3 Bit)*. Der Schwellwert, den ein Knoten nutzt um zu entscheiden, ob er eine Anfrage an einen anderen Knoten weiterleitet, wurde auf drei Bits repräsentiert. Mit Knoten  $i$  wird kooperiert, wenn die Anzahl der Anfrageergebnisse

für die Anfragen die an ihn abgeschickt wurden,  $q_i^r$ , geteilt durch die Anzahl der Nachrichten, die über ihn verschickt wurden,  $q_i^s$ , höher als der Weiterleitungsschwellwert  $FC$  ist. Mit Knoten  $i$  wurde also kooperiert, wenn  $q_i^r / q_i^s > FC$  gilt. Durch die Repräsentation mit 3 Bit erlaubte der Strategievektor acht gleichverteilte Werte zwischen 0 (immer kooperieren) und 1 (immer defektieren).

- *Antwortschwellwert (AC, 3 Bits)*. Bei den Simulationen wurde zwischen Weiterleitung und Beantwortung von Anfragen unterschieden. Im Gegensatz zum einfachen Bearbeiten von Anfragen im formalen Modell aus Kapitel 4, empfängt ein Knoten zwei unterschiedliche Arten von Nachrichten: Nachrichten, die er weiterleiten kann, Nachrichten zum Beantworten. Daher sind auch zwei Schwellwerte nötig. Ein Weiterleitungsschwellwert, für die Entscheidungen bezüglich des Weiterleitens, und ein Antwortschwellwert, der benutzt wird, wenn ein Knoten über die Beantwortung von Anfragen entscheidet. Der Einsatz unterschiedlicher Schwellwerte für das Weiterleiten und die Beantwortung basiert auf Beobachtungen der verhaltensökonomischen Experimente. Ähnlich wie beim Weiterleitungsschwellwert, werden Anfragen beantwortet, wenn  $q_i^r / q_i^s > AC$  erfüllt ist.
- *Wahl des Weiterleiters (FS, 2 Bits)*. Dieser Teil des Strategievektors legt fest, wie der Empfänger einer Nachricht gewählt wird. Dabei werden die vier Alternativen CR, ORF, CRF und ARF berücksichtigt, die eingangs des Kapitels beschrieben wurden.
- *Zielschwellwert (TC, 3 Bits)*: Einige der Strategien für die Wahl des Weiterleiters senden Anfragen nur an vertrauenswürdige Knoten. Um besser zwischen vertrauenswürdigen und nicht vertrauenswürdigen Knoten zu unterscheiden, wird ein weiterer Schwellwert eingeführt, der Zielschwellwert. Ein Knoten hält einen potentiellen Empfänger einer Nachricht für vertrauenswürdig, wenn das Verhältnis von beantworteten Anfragen und die Anzahl der Nachrichten, die über einen bestimmten Teilnehmer verschickt wurden, oberhalb dieses Schwellwerts ist. Ein Knoten  $i$  wird also als vertrauenswürdig eingestuft, wenn  $q_i^r / q_i^s > TC$  gilt. Auch hierfür sind acht gleichverteilte Werte zwischen 0 und 1 möglich.

Neben diesen Strategieeigenschaften wurden auch Freifahrerverhalten berücksichtigt: War einer der drei Schwellwerte gleich 1, so wurde der Knoten als Freifahrer betrachtet: Jeder Knoten löscht auch Anfragen, da die Unterscheidung zwischen kooperativen und unkooperativen Knoten nicht perfekt ist. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass ein Schwellwert von 1 bei Weiterleitungs- und Beantwortungsentscheidungen zum Bearbeiten von Anfragen führt. Folglich ist eine Strategie ähnlich dem Freifahrerverhalten und löscht alle eingehenden Anfragen, wenn einer der Schwellwerte (Weiterleitungsschwellwert oder Antwortschwellwert) gleich 1 ist. Auch Knoten mit einem Zielschwellwert gleich 1 werden als Freifahrer betrachtet: Drei der vier Strategien für die Wahl des Weiterleiters (ORF, CRF und ARF) führen zu vereinfachten Weiterleitungsstrategien, wenn kein vertrauenswürdiger Knoten gefunden wird. Daher würden nur die vereinfachten Weiterleitungsstrategien, also Löschen aller Nachrichten, Weiterleiten an den vertrauenswürdigsten Kontakt oder Weiterleiten basierend ausschließlich auf der Distanz, verbleiben. Neben den hier beschriebenen Strategien wurden in den Simulationen keine weiteren Strategien berücksichtigt.

**Vorgehen bei der Simulation:** Der Strategievektor wird nun genutzt, um verschiedene Simulationen durchzuführen. Zunächst wird dafür eine zufällige, gleichverteilte Startpopulation erzeugt. In der Startpopulation ist also jeder mögliche Strategievektor gleich wahrscheinlich. Ausgehend

von dieser Startpopulation werden dann Simulationen durchgeführt. Jede Simulation besteht aus mehreren Iterationen, jede Iteration aus mehreren Runden. Nach einer Iteration wird der Erfolg jeder Strategie gemessen. Auf Basis des Erfolgs der Strategien wird dann die Population geändert. Die verschiedenen Techniken für die Modifikation der Population werden detailliert am Ende dieses Unterabschnitts diskutiert. Ausgehend von der angepassten Population wird dann die nächste Iteration simuliert. Die Kombination aus Iteration und Modifikation der Population wird wiederholt bis ein Strategiemix erreicht ist, der über mehrere Iterationen stabil ist. Das Vorgehen wird also wiederholt, bis das System einen Gleichgewichtszustand erreicht hat.

Das Vorgehen bei diesen Simulationen ist von genetischen Algorithmen [GKK04] inspiriert. Es besitzt den Vorteil, dass die Knoten ihre Strategien gegen die anderen Knoten optimieren, die mehr als sie selbst verdienen. Dies bildet das Verhalten von Knoten in existierenden Systemen nach. Hier versucht ein Knoten seinen Gewinn zu maximieren und optimiert dafür seine Strategie. Dennoch hat dieser Ansatz einen bedeutenden Unterschied verglichen mit genetischen Algorithmen: Genetische Algorithmen konzentrieren sich auf die Identifikation einer optimalen Lösung für ein gegebenes Optimierungsproblem. Dies ist nicht das Ziel der hier durchgeführten Simulationen, da die optimale Lösung für das System bereits bekannt ist: Kooperieren alle Knoten bedingungslos, so ist die mittlere Auszahlung aller maximal (optimal). Für die hier durchgeführte Untersuchung ist die Entwicklung der Population, also des Strategiemixes, während der Simulation interessant. Insbesondere soll untersucht werden, ob ein Strategiemix stabil gegen die Einführung neuer zufälliger Strategien ist und welche Strategien zum effizienten Gleichgewicht, der optimalen Lösung, führen.

Um den Erfolg einer Strategie zu messen, wird jeder Aktion, wie schon bei den verhaltensökonomischen Experimenten und im spieltheoretischen Modell, ein Nutzenwert zugeordnet. Also wird auch bei den Simulationen der Punktstand eines Knotens reduziert, wenn er beispielsweise eine Nachricht weiterleitet. Tab. 20 fasst die Kosten aller Aktionen und den Erlös für das Erhalten von Anfrageergebnissen zusammen. Die Kosten stimmen mit den Kosten bei den verhaltensökonomischen Experimenten überein (siehe Tab. 7) um die Ergebnisse beider Untersuchungen vergleichbar zu halten und um die Kosten eines realistischen Systems widerzuspiegeln (Beobachtung 13 in Abschnitt 5.3 untersucht die Kostenstruktur mittels Simulation). Der Erlös für das Erhalten von Anfrageantworten ist bei den Simulationen deutlich höher als bei den verhaltensökonomischen Experimenten, um die höhere Systemgröße zu berücksichtigen. Ein wesentlicher Unterschied der Simulationen zum formalen Modell ist, dass jetzt die atomaren Aktionen berücksichtigt werden und nicht mehr auf die vereinfachte Aktion Bearbeiten (Aktion P) zurückgegriffen wird.

<i>Aktion</i>	<i>Punktänderung</i>
<i>Beantworten von Anfragen (Aktion A)</i>	-5
<i>Abschicken von Anfragen (Aktion S)</i>	-2
<i>Weiterleiten von Anfragen (Aktion F)</i>	-1
<i>Erhalten von Anfrageergebnissen (Ereignis R)</i>	2.000

**Tab. 20: Aktionen und Nutzenwerte während der Simulationen**

Innerhalb der Simulationen wird angenommen, dass die Knoten ehrlich sowohl ihre Strategien als auch die Auszahlungen ihrer Strategien Preis geben. Zur Modifikation der Population werden zwei unterschiedliche Ansätze genutzt. Für die Untersuchung der Hypothesen bezüglich der Bestätigung der Gleichgewichte, wird die erste Methode, Imitation, genutzt. Die zweite Me-

thode, Mutation, wird eingesetzt um die Hypothesen bezüglich der Stabilität der Gleichgewichte zu untersuchen. Die beiden Ansätze haben die folgenden Charakteristiken:

- *Imitation*: Jeder Knoten beobachtet die Strategien seiner Kontakte und imitiert die erfolgreichste. Die Intention hinter der Konzentration auf die Kontakte ist die Folgende: In einem strukturierten Peer-to-Peer System hängt die optimale Strategie von der Umgebung des Knoten ab. In einem System ist es für einen Knoten mit ausschließlich konditionell kooperativen Kontakten, optimal sich sehr kooperativ zu verhalten: Seine Kontakte werden dann alle seine Nachrichten bearbeiten. Für einen Knoten mit unkooperativen Kontakten, dagegen, ist es besser nur wenige Anfragen zu bearbeiten um nicht von den Kontakten ausgenutzt zu werden. Der Einsatz von Strategien, die ähnlich der beobachteten Strategien der Kontakte sind, kann also vorteilhaft sein.
- *Mutation*: Mittels Rekombination und Mutation können neue Strategien in die Population eingefügt werden. Dafür werden zufällig zwei Strategien des Knotens selbst und seiner Kontakte abhängig von ihrem Erfolg ausgewählt. Dabei ist es wahrscheinlicher, dass erfolgreiche Strategien ausgewählt werden. Dann wird ein zufälliger Punkt des Strategievektors als Rekombinationspunkt gewählt. An diesem Punkt werden die zwei Strategien kombiniert, es wird also ein neuer Strategievektor erstellt. An den Positionen vor dem Rekombinationspunkt ist der neue Strategievektor gleich der ersten Strategie, an den übrigen Positionen ist er gleich der zweiten Strategie. Schließlich wird ein zufälliges Bit des neuen Strategievektors ausgesucht und geändert (Mutation). Der Knoten nutzt die so erstellte neue Strategie in der nächsten Iteration der Simulation. Dieser Ansatz wird genutzt, um die Stabilität des effizienten Gleichgewichts zu untersuchen. Diese Art der Strategieanpassung wird nicht für jeden Knoten in der Simulation genutzt. Vielmehr werden die Knoten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, der genetischen Wahrscheinlichkeit, ausgewählt. Die Knoten, die nicht ausgewählt werden, nutzen in der nächsten Iteration eine Strategie, die mittels Imitation bestimmt wird.

Neben diesen beiden Möglichkeiten, sind andere Ansätze zur Bestimmung neuer Strategien denkbar. Diese lassen sich jedoch alle einer der beiden Kategorien zuordnen: Sie sind entweder Replikator-Strategien, d.h. sie imitieren entweder existierendes Verhalten, oder Beste-Antwort-Strategien, d.h. sie werden während der Simulation als neue Strategien eingefügt mit dem Ziel für den gegebenen Strategiemix optimal zu sein [HoS03].

**Vergleich zu traditionellen Simulationen:** Das hier vorgestellte Vorgehen unterscheidet sich stark vom Vorgehen bei den meisten existierenden Simulationen im Bereich Anreizmechanismen für dezentralisierte koordinationsfreie Systeme: Traditionelle Arbeiten konzentrieren sich auf wenige bestimmte Strategien (siehe z.B. [Dou02, BuB04b, MaG04, GLM01]), also Strategien, die vom Experimentator selbst vorgegeben wurden. Bei dem hier vorgeschlagenen Vorgehen werden jedoch unterschiedliche Strategieeigenschaften definiert, die kombiniert eine gesamte Strategie beschreiben. Die Strategien basieren dabei auf den Strategien, die in verhaltensökonomischen Experimenten des Systems beobachtet wurden. Diese genetischen Strategien werden über die Zeit verbessert. Dies erlaubt es Strategien zu identifizieren, die über die Zeit stabil sind. Weiterhin lassen sich so unerwünschte Strategien finden, die zum Zusammenbruch des Systems führen.

Zudem hilft dieser Ansatz bei der Identifikation von Strategiemixen, die zu effizienten und zu ineffizienten Gleichgewichten führen. Weiterhin kann so untersucht werden, welche Kombina-

tionen von Strategieeigenschaften zum effizienten Gleichgewicht führt und hilft in diesem Gleichgewicht zu verbleiben.

### 5.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationen beschrieben. Dabei wird zunächst untersucht, unter welchen Voraussetzungen das System das effiziente Gleichgewicht erreicht und wann es das nicht tut. Das effiziente Gleichgewicht ist ein Systemzustand, in dem die mittlere Auszahlung aller kooperativen Knoten gleich dem theoretischen Maximum ist und alle Freifahrer aus dem System verdrängt wurden. Das ineffiziente Gleichgewicht wird erreicht, wenn die mittlere Auszahlung der Knoten nahe dem theoretischen Minimum ist. In beiden Gleichgewichten können die Knoten ihre Strategien ändern, ohne das Gleichgewicht zu verlassen: Wurden beispielsweise alle Freifahrer aus dem System verdrängt und das effiziente Gleichgewicht ist erreicht, so ist bedingungslose Kooperation wieder vorteilhaft: Es existieren keine Knoten mehr, die dieses Verhalten ausnutzen könnten.

#### 5.3.1 Imitation

Im Folgenden wird zunächst auf die Simulationsergebnisse eingegangen, die durch Imitation der Strategien anderer Knoten erreicht werden.

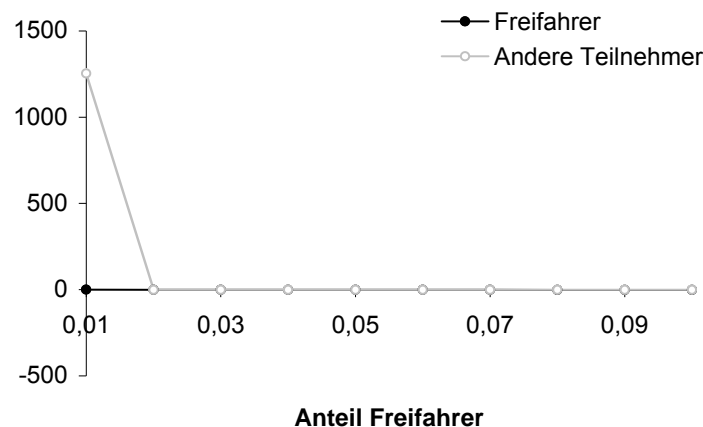


Abb. 19: Auszahlungen der Knoten während der letzten 10 Iterationen

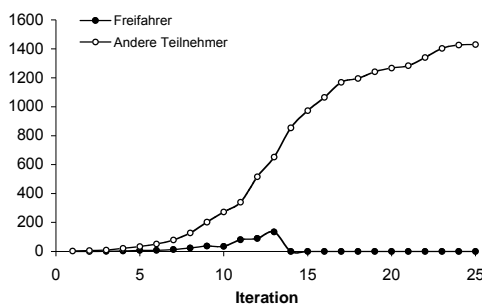
**Hypothesen Existenz der Gleichgewichte und Hohe Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs:** Gemäß der Hypothesen existieren in strukturierten Peer-to-Peer Systemen zwei Gleichgewichte. Entweder das effiziente oder das ineffiziente Gleichgewicht wird erreicht, wenn alle Knoten rationale Nutzenmaximierer sind. Um diese Hypothese zu prüfen, wird die Anzahl der eingangs unkooperativen Knoten, also der Freifahrer, variiert. Zur Prüfung der Hypothese wird ein strukturiertes Peer-to-Peer System mit 10000 Knoten simuliert. Für den Anteil der Freifahrer in der Ausgangspopulation werden Werte zwischen 1% und 10% gewählt. Bei einem Anteil von 1% Freifahrer in der Ausgangspopulation wird das effiziente Gleichgewicht erreicht, während ein Anteil von Freifahrern zwischen 2% und 10% zum ineffizienten Gleichgewicht führt. Abb. 19 zeigt die mittlere Auszahlung der Knoten in den letzten zehn Iterationen der Simulation. Während Simulationen von kleineren Systemen zu quantitativ anderen Ergebnissen führen, hier ist der Anteil der tolerierten Freifahrer höher, sind die Ergebnisse hier qualitativ identisch. Deshalb werden in der weiteren Analyse der Gleichgewichte Netzwerke mit 10000 Knoten betrachtet.

Die Anzahl der Knoten wird erst bei der Untersuchung der Stabilität des erreichten Gleichgewichts wieder geändert.

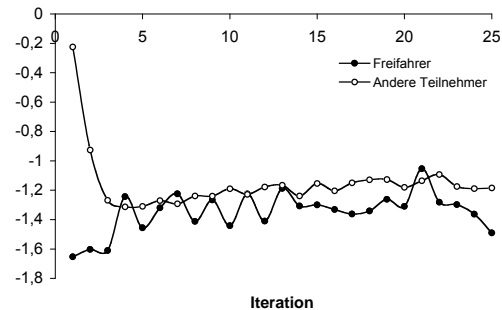
**Beobachtung 1:** Freifahrer profitieren nicht vom System. Ihre Auszahlung ist stets unterhalb oder nahe null. Kooperative Knoten profitieren so lange vom System, so lange der Anteil der Freifahrer in der Ausgangspopulation gering ist. Sobald ein gewisser Teil der Ausgangspopulation Freifahrerverhalten zeigt, bricht das System zusammen.

Beobachtung 1 bestätigt die Hypothese Hohe Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs. Dies ist dadurch bestätigt, dass das System schon bei einem Anteil von 1% der Freifahrer in der Ausgangspopulation zusammenbricht.

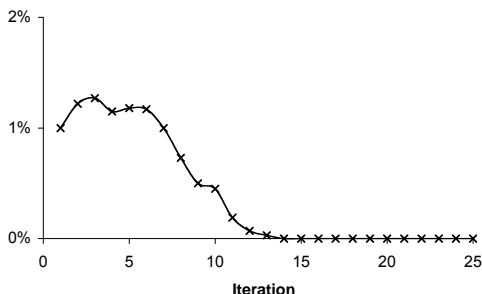
Um zu untersuchen, unter welchen Voraussetzungen das effiziente oder das ineffiziente Gleichgewicht erreicht wird, wird im Folgenden betrachtet, wie sich der Anteil der Freifahrer im System über die Zeit entwickelt. Abb. 20 vergleicht die Entwicklung der Auszahlung und der Anteil der Freifahrer in einem System, welches das effiziente Gleichgewicht erreicht (1% Freifahrer in der Ausgangspopulation, siehe a) und c)), mit einem System, welches dieses Gleichgewicht nicht erreicht (2% Freifahrer in der Ausgangspopulation, siehe b) und d)). Die Unterschiede zwischen beiden Systemen sind in den Abbildungen sichtbar: In beiden Szenarien sind die Auszahlungen aller Knoten während der ersten Iterationen nahe null. In dieser Phase steigt der Anteil der Freifahrer. Diese ersten Iterationen sind Teil des Stabilisierungsprozesses: Die Knoten wechseln zu Strategien, die für den Umgang mit den Strategien der Kontakte optimal sind.



a) Entwicklung der Auszahlung (Effizienz)



b) Entwicklung der Auszahlung (Ineffizienz)



c) Entwicklung der Freifahrer (Effizienz)



d) Entwicklung der Freifahrer (Ineffizienz)

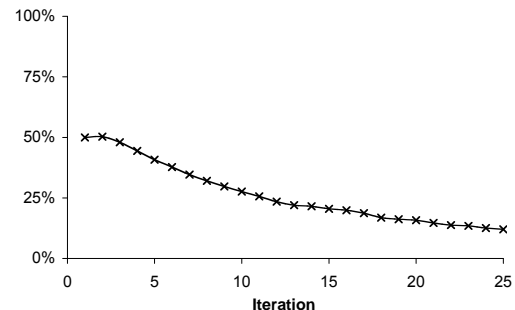
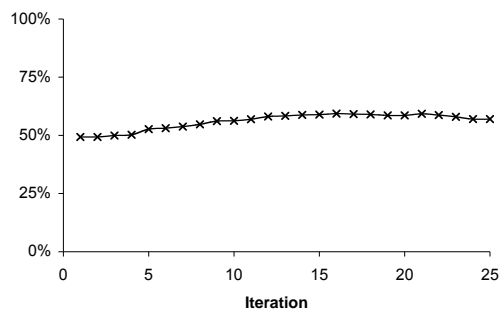
**Abb. 20: Vergleich von Systemen mit Erreichung von Effizienz bzw. Ineffizienz**

Später, wenn das System das ineffiziente Gleichgewicht erreicht hat, sind die Auszahlungen aller Knoten nahe -2, den Kosten für das Absetzen von Anfragen. In diesem Zustand beantwortet kein Knoten Anfragen anderer Knoten. Erreicht das System das effiziente Gleichgewicht, so

steigt der Unterschied in der Auszahlung zwischen kooperativen und unkooperativen Knoten bis die Auszahlung der kooperativen Knoten schließlich Werte nahe 2000 Punkten erreicht, dem Erlös für den Erhalt von Anfrageergebnissen. Nach Iteration 15 sind die meisten Freifahrer aus dem System verdrängt.

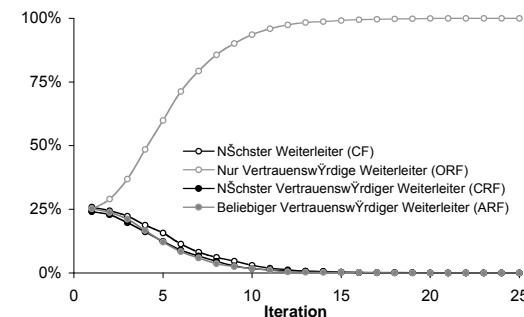
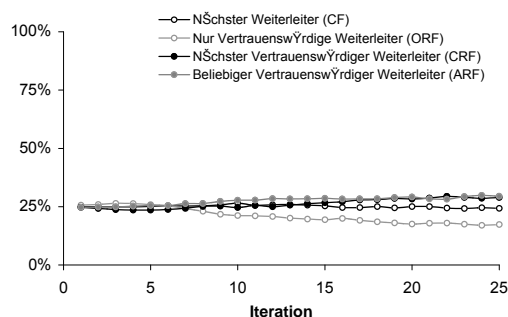
*Beobachtung 2:* Abhängig vom Anteil der Freifahrer wird entweder das effiziente oder das ineffiziente Gleichgewicht erreicht.

Entgegen Beobachtung 1 beschreibt Beobachtung 2 die Gleichgewichte des Systems. Beobachtung 1 erlaubt auch andere Systemzustände neben den Gleichgewichten. Beobachtung 2 hingegen bestätigt die Hypothese Existenz der Gleichgewichte. Die erreichten Gleichgewichte decken sich mit den theoretischen Vorhersagen des formalen Modells: Entweder kooperieren alle Knoten oder es werden keine Nachrichten bearbeitet. In allen Experimenten mit Imitation wurde kein Endzustand beobachtet, der sich von diesen beiden Gleichgewichten unterschied.



a) Entwicklung der Startphase (Effizienz)

b) Entwicklung der Startphase (Ineffizienz)



c) Entwicklung Weiterleiterwahl (Effizienz)

d) Entwicklung Weiterleiterwahl (Ineffizienz)

**Abb. 21: Vergleich von Strategieänderungen unter Effizienz und Ineffizienz**

In den folgenden Absätzen wird näher untersucht, welche Strategien die Knoten nutzen, ehe das System ein Gleichgewicht erreicht (siehe Abb. 21). Diese Untersuchung ist bedeutungsvoll: Es ist insbesondere interessant, welche Voraussetzungen zu einem Gleichgewicht führen. Durch die Untersuchung der Entwicklung des Strategiemixes, ehe das System ein Gleichgewicht erreicht, kann beobachtet werden, welche Strategieeigenschaften einen bedeutenden Einfluss auf das erreichte Gleichgewicht haben. In der hier betrachteten Analyse wird zwischen vier Fällen unterschieden:

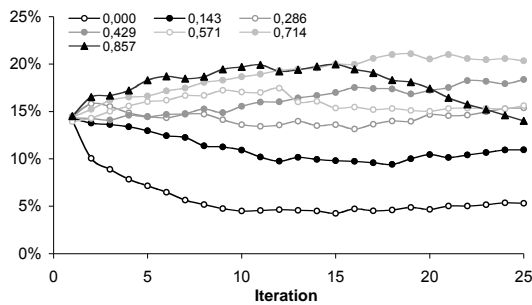
- Strategien im effizienten Gleichgewicht (Iteration 10 und folgende in Abb. 21 a) und c)),
- Strategien in einem System, das sich zum effizienten Gleichgewicht hinentwickelt (vor Iteration 10 in Abb. 21 a) und c)),

- Strategien im ineffizienten Gleichgewicht (Iteration 5 und später in Abb. 21 b) und d))
- Strategien in einem System, das sich zum ineffizienten Gleichgewicht hinentwickelt (vor Iteration 5 in Abb. 21 b) und d)).

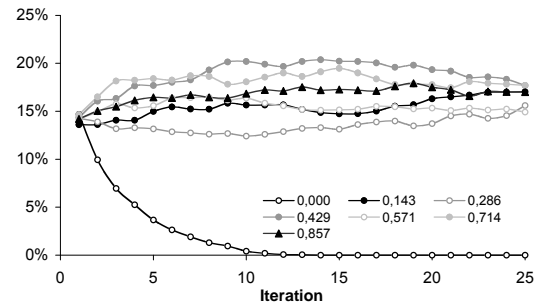
Im Folgenden wird zunächst auf den Einsatz der Startphase eingegangen (Abb. 21 a) und b)).

**Beobachtung 3:** Sobald das ineffiziente Gleichgewicht erreicht wurde, ist der Einsatz einer Startphase ein Nachteil für die Knoten und sie hören auf die Startphase zu nutzen. Solange das ineffiziente Gleichgewicht noch nicht erreicht wurde, kann keine Tendenz für den Einsatz der Startphase beobachtet werden.

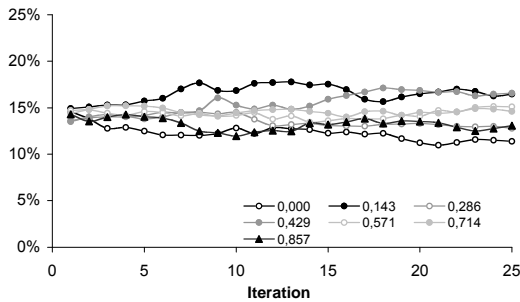
Diese Beobachtung lässt sich mit der Rationalität der Knoten begründen. Im ineffizienten Gleichgewicht ist der Einsatz einer Startphase ein Nachteil: Da kein Knoten Anfragen für andere bearbeitet, ist der Aufbau von Reputation nach dem Betreten des Systems durch bedingungslose Kooperation ein Nachteil. Der Verzicht auf eine Startphase ist in diesem Fall optimal.



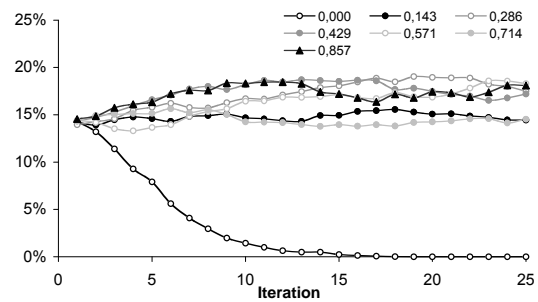
a) Weiterleitungsschwellwert (Effizienz)



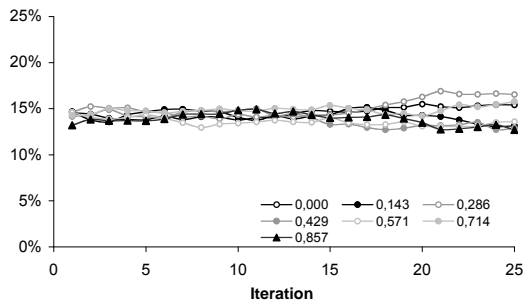
b) Weiterleitungsschwellwert (Ineffizienz)



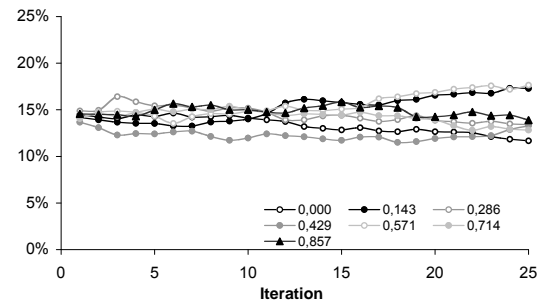
c) Zielschwellwert (Effizienz)



d) Zielschwellwert (Ineffizienz)



e) Antwortschwellwert (Effizienz)



f) Antwortschwellwert (Ineffizienz)

Abb. 22: Entwicklung der Schwellwerte



Als nächstes wird nun die Strategie für die Wahl des nächsten Weiterleiters untersucht. Überraschenderweise ändert sich nur der Anteil der Strategien, die Nachrichten fallenlassen, während der Simulationen signifikant. Also nur der Anteil der Knoten, die eine solche Strategie spielen, nimmt ab oder steigt. Für alle anderen Strategien für die Wahl des Weiterleiters lässt sich keine Änderung beobachten.

*Beobachtung 4:* Im ineffizienten Gleichgewicht (siehe Abb. 21 d)) nutzen alle Knoten eine Strategie, die zum Fallenlassen der Nachrichten führt. Im effizienten Gleichgewicht hingegen (siehe Abb. 21 c)) wird das Fallenlassen von Nachrichten durch kooperativere Strategien verdrängt. Solange noch kein Gleichgewicht erreicht wurde, ändert sich der Anteil der Strategien für die Wahl des nächsten Weiterleiters über die Zeit nicht.

Dieser Effekt lässt sich durch den Vergleich der Wahl des nächsten Weiterleiters mit Freifahrerverhalten erklären. Das Fallenlassen von Nachrichten (unabhängig von der Motivation für das Fallenlassen) wird von den Knoten als eine Art von Freifahrerverhalten betrachtet. Wie das formale Modell vorhersagt, ist das Verlassen des Systems die rationale Entscheidung im ineffizienten Gleichgewicht. Im effizienten Gleichgewicht dagegen gewährleistet der Wettbewerb zwischen den Knoten, dass nur die kooperativsten Knoten vom System profitieren. Hier ist es wahrscheinlich, dass Knoten, die Anfragen fallenlassen, zu kooperativeren Strategien wechseln.

Schließlich werden die Schwellwerte, welche die Knoten nutzen, untersucht (siehe Abb. 22). Hierfür werden zunächst die Schwellwerte für das Weiterleiten (FC) betrachtet. Genau genommen, wird die Entwicklung der Häufigkeit zweier Schwellwerte untersucht (siehe Beobachtung 5 und Beobachtung 6):

- a) bedingungslose Kooperation, also ein Schwellwert von 0 und
- b) der höchste, mögliche Schwellwert, bei dem der Knoten keinem Freifahrerverhalten folgt, also der Wert 0,857.

Die anderen Schwellwerte werden nicht betrachtet: Obwohl die Graphen in Abb. 22 den Eindruck erwecken, dass der Anteil der Knoten, die andere Schwellwerte nutzen, sinkt oder steigt, lässt sich dieses Ergebnis in weiteren Simulationen nicht reproduzieren. Die Ergebnisse für die Schwellwerte 0 und 0,857, wie in Beobachtung 5 und Beobachtung 6 beschrieben, hingegen lassen sich über mehrere Simulationsläufe wiederholen.

*Beobachtung 5:* Freifahrerverhalten verdrängt bedingungslose Kooperation (siehe Abb. 22 b)). Sobald alle Freifahrer aus dem System verdrängt sind (siehe Iteration 15 und folgende in Abb. 20 a)), bleibt der Anteil der Knoten, die bedingungslos kooperieren stabil (siehe Abb. 22 a)).

Im ineffizienten Gleichgewicht ändern die Knoten ihre Schwellwerte nicht: Da kaum Anfragen bearbeitet werden, haben die Schwellwerte keinen Einfluss auf den Erfolg einer Strategie. Die Situation ändert sich jedoch, wenn das effiziente Gleichgewicht erreicht wird.

*Beobachtung 6:* Im effizienten Gleichgewicht, nachdem alle Freifahrer verdrängt wurden, führt Wettbewerb zur Verdrängung von Knoten mit sehr hohen Schwellwerten: Sie werden nun als Knoten betrachtet, die Verhalten ähnlich dem Freifahrerverhalten zeigen, und werden aus dem System verdrängt (siehe Abb. 22 a) nach Iteration 15).

Nun werden die Schwellwerte untersucht, die sich auf die Wahl des Ziels beziehen (TC). In ineffizienten Systemen, entwickeln sich diese Werte ähnlich der Weiterleitungsschwellwerte (FC) (siehe Abb. 22 b) und d)). Im effizienten Zustand des Systems ändern sich diese Schwellwerte (TC and FC) nicht. Der Anteil der Knoten mit einem bestimmten Schwellwert bleibt über die Zeit fast identisch dem Anteil in der Startpopulation. So ändert sich beispielsweise der Anteil der Knoten, die den Schwellwert 0,875 nutzen, von Iteration zu Iteration nicht. Das gleiche gilt auch für die Antwortschwellwerte (AC). Zusammenfassend, während sich die Schwellwerte für das Weiterleiten (FC) und für die Wahl des Ziels (TC) im ineffizienten Gleichgewicht ändern, bleiben die Schwellwerte für das Beantworten (AC) und für die Wahl des Ziels (TC) im effizienten Gleichgewicht gleich. Folglich kann ein Knoten seine Auszahlung nicht erhöhen, indem er den Wert seines Antwortschwellwertes (AC) ändert.

*Beobachtung 7:* Ein Knoten kann seine Auszahlung nicht verbessern indem er den von ihm benutzten Schwellwert zur Entscheidung ob er Anfragen beantwortet (AC) ändert.

Die Wahl des richtigen Weiterleitungsschwellwerts (FC) ist wichtig. Dies ist darin begründet, dass in großen Systemen viele Knoten eine Nachricht weiterleiten müssen, ehe die Anfrage ihr Ziel erreicht. Leitet ein Knoten eine Anfrage über einen vertrauenswürdigen Knoten weiter, so hat dies positiven Einfluss auf seine Auszahlung: Zunächst sei der Fall betrachtet, indem ein Knoten selbst die Anfrage abgesetzt hat. Seine Auszahlung würde nicht steigen, wenn er die Anfrage über einen nicht vertrauenswürdigen Knoten verschickt. Sei nun der Fall betrachtet, in dem der Knoten die Anfrage eines seiner direkten Kontakte gemäß seiner Weiterleitungsstrategie bearbeitet. Wählt der Knoten den falschen Weiterleiter, so hält der direkte Kontakt diesen Knoten selbst für unkooperativ und bearbeitet keine Anfragen mehr für ihn. Folglich kann er in Zukunft nicht mit kooperativem Verhalten des Kontakts und damit mit der Erhöhung seiner Auszahlung rechnen. Sind also die Schwellwerte eines Knoten zu hoch, so wird der Knoten für unkooperativ gehalten. Folglich ist seine Auszahlung geringer, als die Auszahlung eines Knoten mit geringerem Schwellwert. Ist der Schwellwert jedoch gering, so ist die Auszahlung auch gering, da zu kooperatives Verhalten ausgenutzt wird.

Die Situation ändert sich bei der Wahl des Zielschwellwerts (TC): Die meisten Strategien für die Wahl des Weiterleiters greifen auf einen beliebigen Knoten zurück, wenn sie keinen Vertrauenswürdigen Knoten finden, an den sie ihre Anfrage weiterleiten können. Dennoch erreichen die Anfragen hier ihr Ziel und werden nicht gelöscht.

Sobald das Gleichgewicht erreicht wurde, kann das System mit dem formalen Modell verglichen werden. Die Beobachtungen stimmen mit den Vorhersagen des Modells überein. Sobald das Gleichgewicht erreicht ist, wählt kein Knoten Strategien, die von den Gleichgewichtsstrategien abweichen. Die Knoten wählen kein Freifahrerverhalten, wenn das System nahe dem effizienten Gleichgewicht ist, und nur noch wenige Freifahrer im System verbleiben. Zudem steigt die Anzahl der kooperativen Knoten im ineffizienten Gleichgewicht nicht, wie vorhergesagt (siehe die Auszahlungen in Abb. 19: Hier werden keine Nachrichten bearbeitet und alle Auszahlungen der Knoten sind nahe der Kosten für das Absetzen von Anfragen): Die Knoten haben keinen Anreiz zu kooperativen Strategien zu wechseln.

Bisher wurden die Strategien beschrieben, die von Knoten im effizienten und im ineffizienten Gleichgewicht genutzt werden. Die benutzten Strategien in den beiden Gleichgewichten unterscheiden sich in den meisten Aspekten: Die Knoten im effizienten Gleichgewicht tendieren dazu eine Startphase zu benutzen, während die Knoten im ineffizienten Gleichgewicht dies nicht tun. Im effizienten Gleichgewicht, leiten die Knoten ihre Anfragen weiter, selbst wenn sie keinen

vertrauenswürdigen Empfänger finden. Knoten im ineffizienten Gleichgewicht hingegen lassen eingehende Anfragen eher fallen. Schließlich können Knoten, die bedingungslos kooperieren im effizienten Gleichgewicht weiter bestehen, während sie im ineffizienten Gleichgewicht verdrängt werden.

**Hypothesen Startphase and Wahl des Weiterleiters:** Bisher wurde gezeigt, dass die zwei vorhergesagten Gleichgewichte erreicht werden, und es wurden die Strategien identifiziert, die genutzt werden, wenn ein Gleichgewicht erreicht ist. Im Folgenden wird nun untersucht, wie die Wahrscheinlichkeit erhöht werden kann, dass das effiziente Gleichgewicht anstelle des ineffizienten erreicht wird. Hierfür wird der Strategieraum eingeschränkt. In einer ersten Untersuchung werden die Knoten gezwungen eine Startphase zu spielen. Sie werden also gezwungen sich nach dem Betreten des Systems kooperativ zu verhalten. Dies könnte in einem strukturierten Peer-to-Peer Netzwerk erreicht werden, indem das Bearbeiten von Anfragen eines eintretenden Kontakts so lange zurückgehalten werden, bis dieser seine Bereitschaft sich kooperativ zu verhalten gezeigt hat.

*Beobachtung 8:* Sind alle Knoten dazu gezwungen, eine Startphase zu benutzen, so kann das System mit einem größeren Anteil von Freifahrern umgehen.

In Simulationen, in denen die Knoten gezwungen sind eine Startphase zu nutzen, erreicht das System ein effizientes Gleichgewicht, selbst wenn 3% aller Knoten Freifahrerverhalten zeigen. Solche Systeme können also mit einem deutlich größeren Anteil von Freifahrern umgehen als Systeme ohne eine Startphase (siehe Beobachtung 1). Die Hypothese Startphase ist somit bestätigt. Die übrigen Beobachtungen (Beobachtungen 2 bis 7) bezüglich des Verhaltens der Knoten in den Gleichgewichten verbleiben jedoch dieselben. Dies bestätigt, dass Kooperation der Knoten nach dem Betreten des Systems die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird.

Zudem zeigen die Ergebnisse, dass das Löschen von Nachrichten, wenn kein vertrauenswürdiger Empfänger gefunden wird, im ineffizienten Gleichgewicht nicht vorteilhaft ist. Deshalb wird eine andere Experimentreihe durchgeführt, indem die Menge der Weiterleitungsstrategien eingeschränkt werden. Hierfür nutzen alle Knoten eine Startphase und wählen das Ziel ihrer aktuellen Anfrage auf Basis des Vertrauens in das Ziel. Ist das Ziel nicht vertrauenswürdig genug, so wird die Nachricht an den Kontakt weitergeleitet, der dem Anfragepunkt am nächsten liegt (Weiterleitungsstrategie CRF). Nun toleriert das System einen Anteil von 4% Freifahrer. Dennoch ist die Verbesserung gering verglichen mit der Verbesserung durch die Startphase.

*Beobachtung 9:* Das Zwingen der Knoten Anfragen weiterzuleiten, selbst wenn sie keinen vertrauenswürdigen Kontakt besitzen, führt zu Systemen, die einen größeren Anteil von Freifahrern standhalten.

Beobachtung 9 bestätigt die Hypothese Wahl des Weiterleiters. Das Zwingen der Knoten zum Weiterleiten von Anfragen hat einen weiteren Effekt: Im ineffizienten Gleichgewicht verbleiben ausschließlich Freifahrer im System. Alle übrigen Knoten werden verdrängt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass kooperative Knoten auch Anfragen an Knoten weiterleiten, die sie nicht für kooperativ halten. Somit werden sie mit zusätzlichen Kosten konfrontiert. Im ineffizienten Fall aus Abb. 21 ist die Auszahlung der kooperativen Knoten rund 1,49, verglichen mit 1,20 von Teilnehmern, die ihre Anfragen fallenlassen. Diese Werte gelten für Iteration 5, in der kaum noch Anfragen bearbeitet werden. Dennoch ist das Weiterleiten von Nachrichten auch unkooperativer Knoten vorteilhaft um das effiziente Gleichgewicht zu erreichen: Auf Grund der unter-

schiedlichen Schwellwerte folgen einige Knoten der Strategie Freifahren, so werden selbst Nachrichten, die von kooperativen Knoten verschickt werden, fallengelassen. Folglich werden auch einige kooperative Knoten von ihren Kontakten als unkooperative Knoten betrachtet. Deshalb führt das Erzwingen der Weiterleitung von Anfragen, selbst wenn der Empfänger nicht als vertrauenswürdig betrachtet wird, zu Gleichgewichten mit nur wenigen unterschiedlichen Strategien: Im ineffizienten Gleichgewicht verbleiben nur Freifahrer – und keine kooperativen Knoten. Das effiziente Gleichgewicht hingegen kann eher erreicht werden, da in Fällen, in welchen die Kooperativität der Knoten nahe dem Schwellwert, liegt Anfragen dennoch weiter bearbeitet werden. Dies bestätigt die Hypothese, die besagt, dass der Einsatz von Weiterleitungsstrategien, die keine Anfragen fallenlassen, die Wahrscheinlichkeit erhöht, das effiziente Gleichgewicht zu erreichen.

Bisher wurde untersucht, unter welchen Umständen ein System ein Gleichgewicht erreicht. Dabei lag der Fokus darauf, welche Strategien dazu führen, dass das System einem größeren Anteil von Freifahrern widersteht und noch stets das effiziente Gleichgewicht erreicht. Während der Einsatz einer Startphase im effizienten Gleichgewicht nicht vorteilhaft ist, so macht es eine Startphase deutlich wahrscheinlicher, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der verhaltensökonomischen Experimente (siehe Abschnitt 3.3): In den Experimenten zeigten die meisten Teilnehmer bedingungslose Kooperation zu Beginn der Untersuchungen und erreichten das effiziente Gleichgewicht. Dennoch kann das spieltheoretische Modell diesen Effekt nicht erklären: Das Modell konzentriert sich auf die möglichen Gleichgewichte, aber nicht darauf, wie diese erreicht werden können.

### **5.3.2 Mutation**

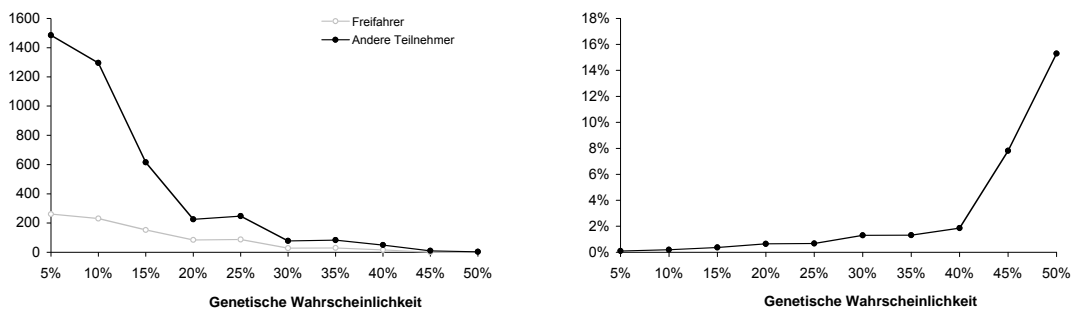
Bisher wurden mit Hilfe der Simulationen zwei Fragestellungen untersucht: Erstens, was sind die Charakteristika der Gleichgewichte des Systems? Zweitens, wie kann die Wahrscheinlichkeit erhöht werden das effiziente Gleichgewicht zu erreichen, indem die Strategieeigenschaften geändert werden? Im Folgenden wird nun das effiziente Gleichgewicht untersucht, nachdem das System diesen Zustand erreicht hat. Dafür wird auf die Methode Mutation aus Abschnitt 5.2 zurückgegriffen. Bei den Untersuchungen wird die Wahrscheinlichkeit mit der die Strategien der Teilnehmer durch Rekombination und Mutation geändert werden, die genetische Wahrscheinlichkeit, zwischen Werten von 5% und 50% variiert. Bei der Analyse liegt der Fokus auf dem Einfluss extrinsischer Parameter, wie der Anzahl der Weiterleitungen und dem Nutzen der Knoten. Für die entsprechende Analyse werden zunächst fünf Iterationen mit den Strategien durchgeführt, die sicherstellen, dass das effiziente Gleichgewicht erreicht wird. Die Knoten folgen also den Strategieaspekten, in den Beobachtungen 1 bis 9 zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines effizienten Gleichgewichtes führten: Die Knoten nutzen also eine Startphase und leiten ihre Anfragen selbst dann weiter, wenn sie keinen ihrer Kontakte für kooperativ halten. Nach diesen fünf Iterationen werden mittels Mutation neue Strategien eingeführt, die nicht den Gleichgewichtsstrategien entsprechen. Nachdem also das effiziente Gleichgewicht erreicht wurde, werden in jeder Iteration neue Knoten die Freifahrerverhalten oder andere Strategien zeigen in das System eingeführt. Da im effizienten Gleichgewicht alle Knoten kooperativen Strategien folgen, kann bei dieser Untersuchung das System das effiziente Gleichgewicht nicht mehr erreichen. Im Folgenden wird daher untersucht, welche Tendenz das System besitzt, d.h. ob es im effizienten Gleichgewicht bleibt oder zum ineffizienten Gleichgewicht tendiert. Als Tendenz des Systems zum effizienten Gleichgewicht werden Zustände des Systems betrachtet, in welchen die Auszahlung der kooperativen Knoten höher als die Auszahlung der unkooperativen Knoten ist und der Anteil der Freifahrer nach Iteration 5, also dem ersten Einfügen von Freifah-

ern, konstant bleibt. Diese Betrachtungsweise ist hilfreich, da das System selbst weder das effiziente noch das ineffiziente Gleichgewicht erreicht, sobald neue Knoten kontinuierlich in das System eingeführt werden.

**Hypothese Einfluss zufälliger Strategien:** Um zu untersuchen, ob Knoten, die mit zufälligen Strategien das System betreten, die Stabilität des Systems verringern, verglichen mit Systemen, in welchen die Knoten nur zu einer Strategie der Kontakte wechseln, wird zunächst ein System mit einer Population von 10000 Knoten und einer Ausgangspopulation entsprechend der Ausgangspopulation bei der Betrachtung von Imitation generiert. Folglich sind auch hier alle Strategien eingangs zufällig gewählt. Als erste Kennzahl wird die Auszahlung im System untersucht (siehe Abb. 23). Die mittlere Auszahlung der Freifahrer liegt unterhalb der Auszahlung der anderen Knoten, selbst wenn die genetische Wahrscheinlichkeit 35% ist. Dies ist ein positives Ergebnis.

*Beobachtung 10:* Sobald neue Freifahrer in das System eingeführt werden, verdienen diese Knoten nicht mehr als die kooperativen Knoten.

Der Anteil der Freifahrer steigt nur langsam bis die genetische Wahrscheinlichkeit bei ungefähr 35% liegt. Ausgehend von diesem Punkt steigt der Anteil der Freifahrer dramatisch an. Dies liegt daran, dass die Auszahlung der Freifahrer deutlich unter der Auszahlung der kooperativen Knoten bleibt, bis eine genetische Wahrscheinlichkeit von 35% erreicht wurde.



a) Entwicklung der Auszahlung

b) Entwicklung der Freifahrer

**Abb. 23: Entwicklung von Kennzahlen während der letzten 10 Iterationen**

Nun wird die Stabilität eines Systems unter Mutation mit einem System unter Imitation verglichen. Die Anzahl der Knoten und der Strategiemix, der anfangs benutzt wird, sind ähnlich. Im Gegensatz zu einem System, in dem Imitation genutzt wird, um den Strategiemix zu ändern, ist der Anteil der Freifahrer, dem das System widersteht, hier deutlich geringer: Jetzt werden nur noch 2% Freifahrer toleriert, während ein System mit Imitation 4% Freifahrer widersteht.

*Beobachtung 11:* Ein System, in welchem Mutation und Rekombination genutzt werden, kann einem geringeren Anteil von Freifahrern widerstehen als ein System, in welchem die Knoten ihre Strategien nur mittels Imitation wählen.

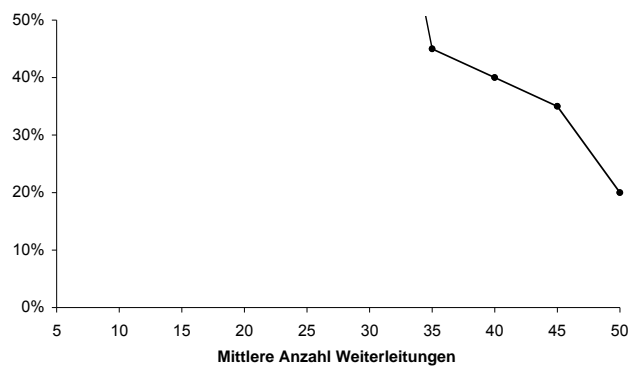
Beobachtung 11 bestätigt die Hypothese Einfluss zufälliger Strategien.

**Hypothese Einfluss der Zahl der Weiterleitungen:** Das Modell sagt voraus, dass der Parameter „Anzahl der Weiterleitungen“ einen negativen Einfluss auf das erreichte Gleichgewicht besitzt. Wenn die Anzahl der Weiterleitungen in einem System steigt, so wird es schwerer, zwischen kooperativen und unkooperativen Knoten zu unterscheiden. Zudem sinkt die Wahr-

scheinlichkeit, dass eine Anfrage beantwortet wird. Die Auszahlung der Freifahrer sollte steigen, verglichen mit der Auszahlung kooperativer Knoten, somit sollte das System destabilisiert werden. Um diese Erwartung zu bestätigen, wird eine Reihe von Simulationen durchgeführt. Dabei wird die Anzahl der Weiterleitungen modifiziert, die eine Anfrage benötigt, bis sie ihr Ziel erreicht. Abb. 24 zeigt das Ergebnis. Die Abbildung zeigt die genetische Wahrscheinlichkeit, die nötig ist, um das System gegen das ineffiziente Gleichgewicht tendieren zu lassen.

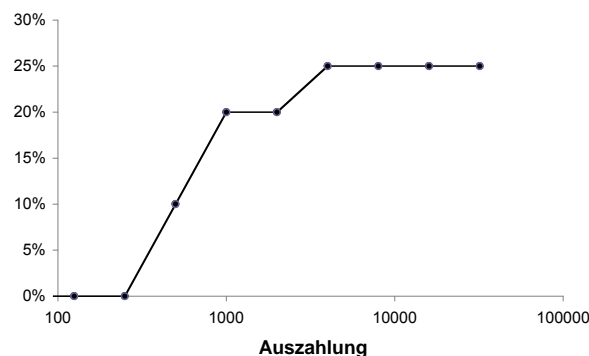
**Beobachtung 12:** In Systemen mit wenigen Weiterleitungen erreicht das System das ineffiziente Gleichgewicht selbst dann nicht, wenn die genetische Wahrscheinlichkeit hoch ist.

Beobachtung 12 bestätigt die Hypothese Einfluss der Anzahl der Weiterleitungen. In dem hier betrachteten Beispiel gilt das für ein System mit 30 Weiterleitungen oder weniger und einer genetischen Wahrscheinlichkeit von 50%. Ist die Anzahl von Weiterleitungen oberhalb dieses Wertes, so ist es wahrscheinlicher, dass das System das ineffiziente Gleichgewicht erreicht.



**Abb. 24: Genetische Wahrscheinlichkeit beim Erreichen Effizienter Gleichgewichte**

**Hypothese Einfluss der Erlöse:** Das spieltheoretische Modell sagt voraus, dass die Knoten eher dazu neigen sich kooperativ zu verhalten, wenn ihre Erlöse hoch sind. Abb. 25 zeigt einen entsprechenden Graphen. Für Auszahlungen unterhalb von 500 endet das System immer in einem ineffizienten Gleichgewicht – selbst wenn der Anteil der Freifahrer in der Startpopulation nahe 0 ist. Für Erlöse oberhalb von 4000 Punkten, steigt die Stabilität des Systems nicht weiter an. Das System widersteht niemals einer genetischen Wahrscheinlichkeit höher 25%. Zwischen 500 und 4000 Punkten steigt die Wahrscheinlichkeit das effiziente Gleichgewicht zu erreichen schrittweise an.



**Abb. 25: Wahrscheinlichkeit des Effizienten Gleichgewichts Abhängig vom Nutzen**

*Beobachtung 13:* Abhängig von der Auszahlung existieren im Wesentlichen zwei Systemzustände. Solange die Auszahlung unterhalb eines bestimmten Wertes liegt, erreicht das System immer das ineffiziente Gleichgewicht. Ist die Auszahlung oberhalb eines anderen Wertes, so widersteht es immer dem gleichen Anteil von Freifahrern. Das weitere Erhöhen der Auszahlung führt nicht zu stabileren Systemen. Mit einem bestimmten Anteil neuer Knoten, und damit auch neuer Freifahrer, pro Iteration, können die Knoten nicht mehr zwischen kooperativen und unkooperativen Knoten unterscheiden. Das System kollabiert.

Diese Beobachtung bestätigt die Hypothese Einfluss der Erlöse.

## 5.4 Diskussion

Im Folgenden wird auf einige Aspekte eingegangen, die durch die Simulationen nicht beantwortet wurden. Dazu zählt der Einfluss der Anzahl der Weiterleitungen und Implikationen der Ergebnisse auf Informatikprobleme.

**Einfluss der Anzahl der Weiterleitungen:** Die Simulationen zeigen, dass große Systeme nicht einmal einem geringen Anteil von Freifahrern widerstehen können. Dies liegt daran, dass in großen Systemen die Überzeugung der Knoten bezüglich dem Verhalten anderer unsicher sind: In großen Systemen, in welchen Nachrichten über viele Knoten weitergeleitet werden, ehe sie den Anfragepunkt erreichen, ist es für den Absender einer Nachricht schwer abzuschätzen, ob ein Kontakt kooperativ ist. Dies ist insbesondere dann schwierig, wenn alle Knoten ihre Strategie autonom wählen können (dies wird bei den meisten Simulationen anderer Forscher nicht berücksichtigt). Nun kann ein Knoten nicht zwischen hartkodierten kooperativen und unkooperativen Strategien der anderen Knoten unterscheiden, da weder Signalisierungsstrategien noch versteckte zentrale Instanzen existieren: Viele unterschiedliche kooperative und unkooperative Strategien existieren. Die meisten Evaluationen gehen nur von einer solchen Strategie aus: Sie alle nutzen entweder Signalisierungsstrategien (z.B. [BuB04b]) oder eine versteckte Instanz (z.B. [FLS04]) um andere Knoten zu identifizieren, die der gewünschten Strategie folgen. Folgt jeder Knoten seiner eigenen Strategie, gibt es also keine Signalisierungsstrategie oder keine zentrale Instanz, so erreicht das System, gemäß der hier beschriebenen Simulationen, das ineffiziente Gleichgewicht, selbst wenn in der Ausgangspopulation nur wenige Freifahrer enthalten sind. Die Simulationen zeigen jedoch auch, dass es für eine überschaubare Anzahl von Weiterleitungen möglich ist, das effiziente Gleichgewicht selbst in der Gegenwart vieler Freifahrer zu erreichen. Dies legt nahe, dass strukturierte Peer-to-Peer Systeme nur mit wenigen Weiterleitungen den effizienten Gleichgewichtszustand erreichen können. Es kann aber gezeigt werden, dass die Interaktion mit weiteren Kontakten die Anzahl der Weiterleitungen drastisch reduzieren kann [HBK07].

**Implikationen der Ergebnisse auf Informatikprobleme:** Die Ergebnisse sind bedeutend für den Entwurf zukünftiger strukturierter Peer-to-Peer Systeme. Im speziellen haben die Ergebnisse folgende Implikationen:

*Implikation 1:* Beim Entwurf eines Peer-to-Peer Systems besteht die Wahl zwischen strukturierten und unstrukturierten Systemen. Die hier beschriebenen Ergebnisse legen nahe, dass strukturierte Peer-to-Peer Systeme vorzuziehen sind. Bei dieser Art von Systemen führt der Wettbewerb der Teilnehmer untereinander dazu, dass sich die Teilnehmer kooperativ verhalten.

*Implikation 2:* Beim Entwurf von Peer-to-Peer Systemen muss zwischen dem Erzwingen einer Startphase oder dem Verzicht darauf unterschieden werden. Gemäß der beschriebenen Ergeb-

nisse sollte eine Startphase erzwungen werden. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten, dass der Einsatz einer solchen Startphase wichtig ist, um mit dem System ein effizientes Gleichgewicht zu erreichen.

*Implikation 3:* Es kann beim Erstellen des Systems entschieden werden, ob der Einsatz von Feedback im System vorgesehen wird oder nicht. Da Knoten auf den Einsatz von Feedback verzichten, solange das System eine vorgegebene Struktur besitzt, kann beim Entwurf des Systems auf Feedback verzichtet werden, wenn im System Struktur vorgesehen wird.

Sowohl Forscher als auch Entwickler investierten viel Zeit für die Erstellung von Peer-to-Peer Systemen, welche mit Fehlverhalten der Knoten umgehen können. Jedoch zeigen empirische Studien [ZgA07] solcher Systeme, dass falsche Entwurfsentscheidungen dazu führen, dass das System sich nicht wie erwartet verhält. Durch die Kombination von verhaltensökonomischen Experimenten, Spieltheorie und Simulationen, ehe das System selbst umgesetzt wurde, können solche Entwurfsentscheidungen verhindert werden.



## 6 Vergleich mit traditionellem Softwareentwurf

Cosmides und Tooby [CoT94] analysieren die Fähigkeit von Menschen Verhalten zu bestimmen, das rational optimal ist. Sie zeigen, dass Menschen optimale Lösungen für spezielle Interaktionsprobleme finden, während es ihnen schwer fällt rational optimale Entscheidungen in Situationen zu treffen, die ihnen fremd sind. Dies eröffnet die Frage, ob Strategien, die von einem Menschen entworfen wurden, der Strategie folgen, die in Anbetracht eines entworfenen Anreizmechanismus optimal ist.

Verhaltensökonomien haben beobachtet, dass die Strategien menschlicher Teilnehmer in sozialen Dilemmas davon abhängen, wie die Einzelnen ihre Strategien entworfen haben. Ökonomen unterscheiden dabei zwischen Strategien, die Teilnehmer in Verhaltensexperimenten gegen andere Teilnehmer spielen (Onlinespiele) und Strategien, die Teilnehmer spezifizieren ohne sie selbst zu spielen (Offlinespiele). Hoffman et al. [HMS98] analysieren verschiedene Verhaltensökonomische Experimente in diesem Kontext. Sie beobachten, dass sich Strategien in Onlinespielen von Strategien in Offlinespielen unterscheiden. Die Unterschiede zwischen den Strategien erklären sie mit der Wahrnehmung des Verhaltens des Gegenübers. Während in Onlinespielen Kooperation des Gegenübers als Signal für Kooperativität gewertet wird, werden solche Signale in Offlinespielen nicht wahrgenommen. Bazerman et al. [BMT99] zeigen, dass Teilnehmer eher dazu tendieren sich fair zu verhalten, wenn sie ihr Verhalten für jede Interaktion spezifizieren müssen, statt es für eine gesamte Strategie festzulegen. Gemäß Brosig et al. [BWY03] resultieren diese Unterschiede aus zwei Effekten:

1. *Positive Selbsteinschätzung*: Menschen tendieren zu der Überzeugung, sie seien großzügig, fair und kooperativ.
2. *Konsenseffekt*: Menschen neigen dazu, das Verhalten von anderen zu erwarten, dass sie in der Situation des Gegenübers befolgen würden.

Dies führt dazu, dass Teilnehmer in Offlinespielen mit sehr kooperativem Verhalten der Gegenüber rechnen. Folglich ist es nahe liegend für den Einzelnen, das naiv, kooperative Verhalten der Gegenübers auszunutzen. Folgt eine Mehrheit der Teilnehmer eines Systems diesem Verhaltensmuster, so bricht es zusammen. In Onlinespielen sind die Strategien anders. Hier kann das Verhalten des Gegenübers beobachtet und darauf reagiert werden, ohne selbst Annahmen machen zu müssen.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde sowohl verhaltensökonomisch als auch formal gezeigt, dass reziproke Schwellwertstrategien in einem strukturierten Peer-to-Peer System zu einem effizienten Gleichgewicht führen. Zudem wurde gezeigt, dass menschliche Teilnehmer in verhaltensökonomischen Experimenten diese Schwellwertstrategien nutzen und so das effiziente Gleichgewicht erreichen. Die Ergebnisse zu Offlinespielen legen jedoch nahe, dass menschliche Teilnehmer, die Strategien implementieren statt sie zu spielen, unter bestimmten Umständen nicht das effiziente Gleichgewicht erreichen. Daher wird im Folgenden das Verhalten von Menschen untersucht, die ihre Strategie implementieren. Dieser Schritt ist essentiell: Finden Entwickler sofort dieselben Strategien wie Teilnehmer in Experimenten mit menschlichen Teilnehmer, so wäre eine Untersuchung mit spieltheoretischen Methoden nicht notwendig.

## 6.1 Experimententwurf

Um das Verhalten von Menschen, die Strategien programmieren, zu untersuchen wurden weitere Experimente durchgeführt [SBV08]. Diese Experimente sollten den Softwareentwicklungsprozess widerspiegeln. Sie werden im Folgenden als Offline Experimente bezeichnet. Dabei wird jeder Teilnehmer dazu aufgefordert, die Strategie seines Knotens zu implementieren. Die Implementierungen unterschiedlicher Knoten interagieren dann miteinander in einer hierfür realisierten Simulationsumgebung ähnlich der Experimentumgebung aus Kapitel 3.

In den Offline Experimenten spezifiziert jeder Teilnehmer die Strategie seines Knotens mittels einer Java Implementierung. Die strategischen Möglichkeiten des Teilnehmers sind dabei identisch den Möglichkeiten der Teilnehmer in den verhaltensökonomischen Experimenten: Ein Teilnehmer kann also definieren, ob und für wenn der von ihm kontrollierte Knoten, Anfragen weiterleitet, beantwortet oder abschickt. Zudem kann er festlegen, welcher andere Knoten die weitergeleiteten und abgeschickten Anfragen erhält. Die Simulationsumgebung kontrolliert auch hier, wo und wer die Datenobjekte speichert, welche Kontakte ein Knoten besitzt und wie Anfragen bearbeitet werden (mit Ausnahme der eben beschriebenen strategischen Entscheidungen). So berechnet die Umgebung für weiterzuleitende Anfragen den Abstand zwischen den möglichen Weiterleitern und dem Anfragepunkt und gibt diese Entfernung dem Teilnehmer zurück. Zudem ordnet die Experimentumgebung den Teilnehmern Zonen zu. Daneben generiert sie (wie auch bei den verhaltensökonomischen Experimenten) zufällig Anfragen, welche die Teilnehmer dann abschicken können. Dabei wird auch bei den Offline Experimenten darauf geachtet, dass diese Anfragen über den Schlüsselbereich gleich verteilt sind.

Wie auch in den verhaltensökonomischen Experimenten, verwalten alle Knoten gleich große Zonen. Alle Knoten kennen gleich viele Kontakte und können mit der gleichen Anzahl von Anfragen rechnen. Auch die Offline Experimente werden in Runden durchgeführt. Jeder Knoten kann jede Runde eine Anfrage absetzen, während er alle eingegangenen Anfragen bearbeiten darf. Für jede Anfrage, wird dem Teilnehmer, wie bei den verhaltensökonomischen Experimenten, eine Liste potentieller Empfänger und deren Entfernung zum Anfragepunkt gezeigt. So ist es auch den Teilnehmern der Offline Experimente möglich, bei der Wahl des nächsten Empfängers zwischen dessen Distanz zum Anfragepunkt und dessen Reputation abzuwägen.

Auch den Teilnehmern in Offline Experimenten werden, gleich wie den Teilnehmern in den verhaltensökonomischen Experimenten, für ihre Aktionen Punkte gut geschrieben oder abgezogen. Auf Basis dieser Punkte werden die Teilnehmer am Ende der Offline Experimente bezahlt.

Nach den Offline Experimenten wird ein Strategiespiel durchgeführt. Wie schon die Implementierungen vollständiger Strategien der Teilnehmer zeigen, hat das Strategiespiel zwei Vorteile: Zum Einen können Fehler in der Implementierung entdeckt werden. D.h. es kann untersucht werden, ob die Implementierung auch der vom Teilnehmer gewünschten Logik folgt. Zum Anderen sind die in Strategiespielen beobachteten Strategien leichter als Quellcode auszuwerten und mit anderen Strategien zu vergleichen.

Mit den Teilnehmern der Offline Experimente wurden zwei Untersuchungen auf der Basis der Untersuchungen aus Abschnitt 3.3.3 durchgeführt: Die Untersuchung Standard und die Untersuchung mit Information. Die Kostenstruktur in beiden Untersuchungen war gleich, wie in den entsprechenden Untersuchungen der Experimentreihe zur Untersuchung des Einflusses von Wettbewerb auf Kooperativität. Eine Untersuchung genau dieses Aspekts ist besonders interessant: In diesem Szenario lässt sich der Einfluss eingeschränkter Rationalität auf den Entwick-

lungsprozess besonders gut beobachten. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, ist in diesem Szenario volle Kooperation mit allen Teilnehmern (unabhängig von deren Auszahlung) rational. Andere verhaltensökonomischen Arbeiten legen aber nahe, dass menschliche Teilnehmer in diesem Szenario zu Ungleichheitsaversion neigen [FeS99]. Teilnehmer könnten in diesem Szenario also dazu neigen, nicht der effizienten Strategie zu folgen und andere zu bestrafen, die mehr verdienen als sie selbst.

## 6.2 Realisierung der Experimente

Die Offline Experimente wurden mit einer Gruppe von Informatikstudenten durchgeführt. Diese Studenten nahmen ein Semester lang an einem Kurs zu strukturierten Peer-to-Peer Systemen teil. Zu Beginn des Semesters schrieben sich 14 Studenten in den Kurs ein. Drei von ihnen schlossen ihn nicht ab. Nur elf Studenten nahmen das ganze Semester an dem Kurs teil.

Zu Beginn des Kurses wurden die Teilnehmer in die theoretischen Grundlagen strukturierter Peer-to-Peer Systeme eingeführt. Um mit der Simulationsumgebung vertraut zu werden, baten wir die Teilnehmer eine erste Strategie zu implementieren, in der die eigene Implementierung mehr Punkte als die Implementierungen der anderen Teilnehmer erhalten sollte. Für die Aufgabenstellung hatten die Teilnehmer zwei Wochen Zeit. Danach wurden alle über den Erfolg ihrer Strategien informiert. Der ‚Erfolg‘ war in diesem Zusammenhang die Punktzahl, welche die Implementierung eines Studenten in einer Simulation bestehend aus mehreren der eigenen Implementierung und mehreren Implementierungen anderer Studenten erreichte. Für die Simulation wurde jedem Teilnehmer zufällig eine Zone zugewiesen.

Dieses Vorgehen wurde während des Kurses (fünfmal) wiederholt. Dabei wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Strategien kontinuierlich weiter zu verbessern. In den ersten beiden Iterationen erhielten die Teilnehmer zusätzlich zu den übrigen Informationen alle Strategien, welche die anderen Teilnehmer in der vorangehenden Iteration realisiert hatten. Zudem bekamen sie eine zusätzliche Strategie, mit der sie ihre eigene Strategie vergleichen konnten. In der ersten Iteration kooperierte diese Strategie immer. In der zweiten Iteration zeigte der zusätzliche Knoten Freifahrerverhalten. Die Teilnehmer wurden gebeten Strategien zu erstellen, die mindestens so erfolgreich sind wie die zusätzliche Strategie. Die beiden folgenden Iterationen waren grundsätzlich ähnlich, um die Teilnehmer weiter mit dem Anwendungsgebiet vertraut zu machen. In der fünften Iteration, die im Folgenden analysiert wird, wurden die Teilnehmer abhängig von ihrem Erfolg ausgezahlt.

Die Simulationsumgebung erlaubte es den Studenten verschiedene Implementierungen gleichzeitig im Simulator zu nutzen. Der Simulator wurde auch zur Evaluation der Ergebnisse genutzt. Mit Hilfe der Umgebung konnten die Punkte berechnet werden, welche jeder Teilnehmer mit seiner Implementierung erreichte. – Gemäß eines Fragebogens, der am Ende des Semesters ausgegeben wurde, verbrachten die Teilnehmer durchschnittlich 6,67 Stunden pro Woche mit der Weiterentwicklung ihrer Implementierung.

Um die Kosten für das Experiment überschaubar zu halten, konnten nur in der letzten Iteration monetäre Anreize geschaffen werden. Für diesen Schritt wurden die Teilnehmer darüber informiert, dass die Auszahlung € 1,00 für 1000 Punkte, die sie mit ihrer Strategie erreichen würden, beträgt. Zudem wurden die Teilnehmer darüber informiert, dass ihre Strategie sowohl mit vom Experimentator implementierten Strategien, als auch mit Strategien der Teilnehmer selbst evaluiert werden würde. Zudem wurde den Teilnehmern mitgeteilt, dass jede Simulation mindestens 1000 Runden dauern würde. Danach sollte ein sechs-seitiger Würfel geworfen werden, um

ähnlich wie bei verhaltensökonomischen Experimenten das Ende des Experiments zu bestimmen. Sollte der Würfel 1 zeigen würde das Experiment enden, andernfalls sollte es weitere 50 Runden dauern. Die Spielbeschreibung, welche den Teilnehmern für dieses Experiment ausghändig wurde, befindet sich in Anhang B.

### 6.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Offline Experimente beschrieben und mit den entsprechenden Untersuchungen der verhaltensökonomischen Experimente aus Abschnitt 3.3.3 verglichen. Hierfür wird im Folgenden zunächst auf die Ähnlichkeiten der in beiden Experimenten beobachteten Strategien eingegangen, ehe die Unterschiede erläutert werden.

#### 6.3.1 Ähnliche Strategieeigenschaften

Wie im Kapitel 4 beschrieben, sollten rationale Teilnehmer mit ihren Nachbarn Schwellwertstrategien spielen. Um diesen Aspekt zu untersuchen, vergleichen wir die Strategiespiele beider Experimente. Tab. 21 zeigt das Ergebnis.

Strategie	Kategorie	Anz. Spieler (verhaltensök.)	Anz. Spieler (offline)
Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit (SSEV)	(1)	35	5
SSEV mit End- oder Startphase	(2)	9	1
SSEV mit Limitierung der Anzahl verschickter Antworten pro Runde	(2)	0	1
Schwellwertstrategien abhängig von der absoluten Anzahl nicht beantworteter Anfragen	(2)	0	1
Vollständige Kooperation	(3)	11	0
Vollständige Kooperation mit Bedingung, dass Auszahlung hoch	(3)	3	0
Vollständige Kooperation mit Limitierung der Anzahl verschickter Antworten pro Runde	(3)	1	
Unterschiedliche Strategien mit Freifahrerverhalten	(3)	0	2
Unterschiedliche andere Strategien	(3)	1	1
$\Sigma$		60	11

**Tab. 21: Vergleich in verhaltensökonomischen und Offline Experimenten**

Wie schon bei der Identifikation von Schwellwertstrategien in Abschnitt 3.3.1 klassifizierten wir die beobachteten Strategien in drei Kategorien: Schwellwertstrategien abhängig von der Erfolgswahrscheinlichkeit in der Vergangenheit (Kategorie (1)), Schwellwertstrategien mit Modifikationen (Kategorie (2)) und andere Strategien (Kategorie (3)).

Die Werte in Tab. 21 bestätigen mittels eines Binomialtests, dass Teilnehmer Schwellwertstrategien spielen auf einem Signifikanzniveau von 1% für die Verhaltensökonomischen Experimente und von 15% für die Offline Experimente. 44 von 60 (acht von elf) Teilnehmer in den verhal-

tensökonomischen (Offline) Experimenten spielen reziproke Strategien. Ein Binomialtest bestätigt auf einem Signifikanzniveau von 1%, dass sich die Teilnehmer reziprok verhalten.

Wie vom formalen Modell vorhergesagt, erkannten also sowohl die Teilnehmer an verhaltensökonomischen Experimenten als auch an Offline Experimenten das Potenzial reziproker Schwellwertstrategien.

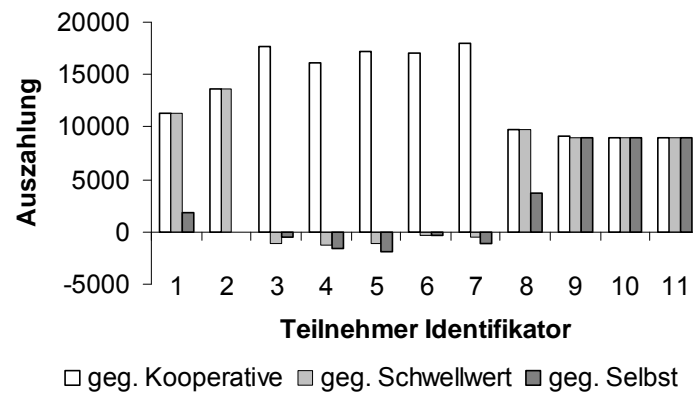
### **6.3.2 Unterschiede zwischen den Strategien**

Im Folgenden wird zunächst auf den Grad an Kooperativität, der in den Experimenten gezeigt wurde eingegangen. Um verhaltensökonomische und Offline Experimente vergleichbar zu machen, wurden Systeme von sechs Knoten für zwanzig Runden simuliert. Hierfür wurden die Implementierungen, die in den Offline Experimenten entstanden, untersucht. Mit jeder möglichen Kombination der Implementierungen, welche von den Teilnehmern abgegeben wurden, wurden Simulationen durchgeführt und jeweils fünf Mal mit unterschiedlichen Positionen der Peers wiederholt. Während der mittlere Grad an Kooperativität bei den verhaltensökonomischen Experimenten bei 82% lag, lag er bei 51% in den Offline Experimenten. Andere Mechanismen, so wie Bestrafung (64%) [FeG02] oder Feedback (69%) [SeS01] erreichen im Mittel ähnlich viel Kooperation wie in den hier beschriebenen verhaltensökonomischen Experimenten. Systeme ohne jegliche kooperationserhöhenden Mechanismen führen zu Graden an Kooperativität (40% - 50%) [SeS01], vergleichbar mit den Offline Experimenten. Daraus kann geschlossen werden, dass Teilnehmer in verhaltensökonomischen Experimenten stärker kooperieren als in Systemen, in welchen traditionelle Mechanismen aus der Literatur eingesetzt werden, während sie in Offline Experimenten weniger kooperativ sind.

Um den Grad an Kooperation weiter zu untersuchen, wurden weitere Simulationen mit den von den Teilnehmern in den Offline Experimenten realisierten Strategien durchgeführt. Diese Simulationen dauerten 1000 Runden mit jeweils 100 Knoten. Zunächst wurden zwei Referenz-Untersuchungen durchgeführt: In der einen spielten 100 Schwellwertstrategien, in der anderen 100 vollständig kooperative Strategien. In beiden Untersuchungen lag die Auszahlung der Knoten bei rund 8500 Punkten. Es können folglich rund 8500 Punkte erreicht werden, wenn alle Knoten kooperatives Verhalten zeigen, wenn das System also effizient ist.

Anschließend wurde ein System bestehend aus 99 vollständig kooperativen Knoten und genau einer Strategie simuliert, die von einem der Teilnehmer kontrolliert wurde. Abb. 26 (weiße Balken) zeigen den Erfolg der Strategien der Teilnehmer. Die Auszahlung aller liegt im Bereich von 8.500 Punkten oder höher. So erreicht beispielsweise die Strategie von Teilnehmer 3, bei der Simulation in einem System mit 99 vollständig kooperativen Knoten, 17699 Punkte. Strategien 3 bis 7 bearbeiten nicht viele Anfragen. Folglich sind ihre Kosten gering und ihre Auszahlung deutlich über den durchschnittlich erreichbaren Werten.

Anschließend wurden Simulationen mit 99 Schwellwertstrategien und einer Teilnehmerstrategie durchgeführt. In diesem Szenario erreichte beispielsweise die Strategie von Teilnehmer 3 1190 Punkte. Fünf von elf Strategien profitieren nicht vom System. Dies hat verschiedene Ursachen: So bearbeitet Strategie 3 nur 20% der Anfragen. Sie zeigt damit leicht beobachtbares Freifahrerverhalten. Die Strategien 4 und 5 sind Schwellwertstrategien. Sie beschränken aber die Anzahl der bearbeiteten Anfragen pro Runde auf einen bestimmten Wert. Auch die Strategien 6 und 7 sind Varianten von Freifahrer Strategien.



**Abb. 26: Simulation der Strategien aus den Offline Experimenten**

Abschließend wurden Simulationen durchgeführt, in welchen ausschließlich Implementierungen der Studenten simuliert wurden. Fünf der elf Systeme kollabierten, d.h. in diesen Systemen bearbeitete nach ca. 200 Runden keiner der Knoten mehr eine Anfrage (Strategien 3 bis 7). Dieses Ergebnis ist überraschend: In keinem der hier beschriebenen verhaltensökonomischen Experimente wurde ein Kollaps des gesamten Systems beobachtet. Zudem hätte erwartet werden müssen, dass die realisierten Strategien mindestens robust gegenüber Schwellwertstrategien und der eigenen Implementierung sind.

Um den Einfluss von Heterogenität auf das Verhalten der Teilnehmer zu untersuchen, werden die Ergebnisse des Strategiespiels betrachtet. Die zentrale Frage hier ist: Ändert sich das Verhalten gegenüber einem Knoten der deutlich mehr verdient? Tab. 22 zeigt das Ergebnis (Die Zahlen bezüglich der verhaltensökonomischen Experimente sind identisch den Werten in Tab. 16, werden hier aber zur Übersichtlichkeit wiederholt). Es wird zunächst das Ergebnis der verhaltensökonomischen Experimente betrachtet. 34 (37) Teilnehmer beantworten Anfragen (leiten Anfragen weiter), die vom ausgewählten Knoten geschickt wurden, als wären sie von einem beliebigen Knoten geschickt worden. Vier (Fünf) Teilnehmer bevorzugen ausgewählte Knoten. Nur zwölf (acht) Teilnehmer kooperieren mit dem ausgewählten Knoten weniger als mit anderen Knoten. Die Situation unterscheidet sich von den Offline Experimenten. Hier, ändern sechs (vier) von elf Teilnehmern ihr Verhalten gegenüber dem ausgewählten Knoten. Kein Teilnehmer verhält sich ihm gegenüber kooperativer als gegenüber dem ausgewählten Knoten. Damit lässt sich keine eindeutige Tendenz für den Umgang mit Heterogenität in Offline Experimenten beobachten.

	<i>verhaltensökonomisch</i>		<i>offline</i>	
	<i>Antworten</i>	<i>Weiterleitung</i>	<i>Antworten</i>	<i>Weiterleitung</i>
<i>Gleiche Strategie für alle Spieler</i>	34	37	5	7
<i>Anfragen des ausgewählten Peers werden bevorzugt bearbeitet</i>	4	5	0	0
<i>Anfragen des ausgewählten Peers werden nicht bearbeitet</i>	12	8	6	4
$\Sigma$ (ohne ausgewählte Knoten)	50	50	11	11

**Tab. 22: Verhaltensänderung unter Heterogenität**

Dennoch lässt sich beobachten, dass die Teilnehmer in verhaltensökonomischen Experimenten intuitiv erkennen, dass das Streben nach fairen Ergebnissen nicht vorteilhaft ist. Die Teilnehmer in Offline Experimenten bemerken dies jedoch nicht. So begründeten zwei Teilnehmer in diesen Experimenten beispielsweise ihr Freifahrerverhalten gegenüber dem ausgewählten Knoten damit, dass dieser wohl immer kooperieren werde.

## 6.4 Diskussion

Entwickler neigen dazu basierend auf den von ihnen erwarteten Strategien sehr erfolgreiche, reaktive Strategien zu realisieren. D.h. die entwickelten Strategien können sehr gut mit Attacken oder anderen Strategien umgehen – solange diese vom Entwickler erwartet werden. Diese Strategien sind meist rational und ausgereift. Dennoch erwarten viele Entwickler sehr naive und kooperative Strategien. Sie scheinen zudem Probleme zu haben, die Auswirkungen ihres Verhaltens auf die Strategien anderer abzuschätzen. In der Folge, erreichen Teilnehmer in Offline Experimenten – im Gegensatz zu Teilnehmern in verhaltensökonomischen Experimenten – oft nicht das effiziente Gleichgewicht des strukturierten Peer-to-Peer Systems. Da die Motivation hinter dem Verhalten von Teilnehmern in verhaltensökonomischen Experimenten gleich der Motivation in Offline Experimente ist, kann dieser Unterschied nur aus den unterschiedlichen Experimentaufbauten resultieren.

Ähnliche Unterschiede lassen sich in existierenden Peer-to-Peer Tauschbörsen beobachten. Einige dieser Systeme zwingen die Teilnehmer des Systems zu einem minimalen Grad an Kooperativität um vom System zu profitieren, wie z.B. bitTorrent [ZgA07]. Das System endet dann in einer Situation, in welcher die Teilnehmer nur zum minimal akzeptierten Grad kooperieren [ZgA07]. Dieses System ist eine Erweiterung von Systemen ohne Reputationsmechanismus, wie Kazaa [SGG02] und Gnutella [AdH00], in welchen sich ein Großteil der Teilnehmer auf das Freifahren beschränkt. Die hier beschriebenen Ergebnisse legen nahe, dass dies das Resultat einer nicht-strategischen Sicht auf solche Systeme ist: Teilnehmer in Offline Experimenten finden die für sie besten Strategien nicht.

Heute erstellen Entwickler für verteilte Systeme zunächst eine erste Version ihrer Software und machen diese anderen verfügbar. Sobald die Software großflächig eingesetzt wird, beginnen einige Benutzer sie zu missbrauchen. Die Software wird dann gegen den entsprechenden Angriff abgesichert und der Kreislauf beginnt von vorn. Natürlich entstehen erfolgreiche Strategien durch die Verbesserung der Software über mehrere Iterationen. Die Simulation dieser Schritte im Labor mittels verhaltensökonomischen Experimenten könnte die Entwicklungskosten verteilter, koordinatortreier Systeme deutlich reduzieren: Missbrauchsmöglichkeiten könnten in einem früheren Stadium erkannt werden. Software die so entwickelt wird, sollte schon bei der ersten Installation ausgefeilt sein.





## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden strukturierte Peer-to-Peer Systeme unter strategischen Gesichtspunkten analysiert. Dafür wurden zunächst verhaltensökonomische Experimente durchgeführt, in welchen menschliche Teilnehmer das Verhalten von Peers in solchen Systemen imitierten, also spielten. Mit diesen Experimenten konnte gezeigt werden, dass menschliche Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen mit bilateralen Verbindungen reziproke Schwellwertstrategien spielen. Sie kooperieren also mit ihrem Kontakt, wenn dieser in der Vergangenheit ihnen selbst gegenüber kooperativ war. Dabei greifen die Teilnehmer nicht auf Feedback, also Beobachtungen anderer Teilnehmer, zurück: Durch Feedback wäre es den Teilnehmern möglich, das Verhalten anderer im eigenen Interesse zu manipulieren. Dennoch wird in strukturierten Peer-to-Peer Systemen auch ohne Feedback ein hoher Grad an Kooperativität der Teilnehmer erreicht. Dies ist auf Wettbewerb zurückzuführen: Damit die Anfragen eines Teilnehmers von anderen bearbeitet werden, muss dieser in den Augen seiner Kontakte kooperativ erscheinen. Als kooperativ wird er jedoch nur betrachtet, wenn er sich ähnlich kooperativ oder kooperativer als die übrigen Teilnehmer verhält. Der einzelne Teilnehmer hat also stets das Interesse, mindestens so kooperativ wie die anderen Teilnehmer zu sein.

Mit Hilfe eines spieltheoretischen Modells konnte gezeigt werden, dass in solchen Systemen zwei Gleichgewichte existieren: Eines, in dem alle Teilnehmer mit den anderen Teilnehmern kooperieren und eines, in dem kein Teilnehmer Anfragen bearbeitet.

Diese Gleichgewichte wurden dann mittels Simulationen untersucht. So konnte gezeigt werden, dass beide Gleichgewichte erreicht werden, dass aber insbesondere in Systemen mit vielen Weiterleitungen meist das unerwünschte Gleichgewicht, in dem keine Anfragen bearbeitet werden, erreicht wird.

Die gleiche Beobachtung wurde auch in Experimenten mit menschlichen Teilnehmern, welche die Strategie eines Knoten implementieren, gemacht. Auch implementierte Strategien spielen oft das unerwünschte Gleichgewicht.

### 7.1 Beitrag

Diese Arbeit ist unter verschiedenen Aspekten bedeutungsvoll: (1) Zunächst gibt diese Arbeit Aufschluss über das Verhalten menschlicher Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen. Insbesondere kann gezeigt werden, dass sich die Teilnehmer in strukturierten Peer-to-Peer Systemen gegenüber anderen kooperativ verhalten. Auf Basis dieses Ergebnisses kann bei der Entwicklung strukturierter Peer-to-Peer Systeme für den Einsatz in der Praxis auf zusätzliche Anreizmechanismen, wie beispielsweise Feedback, verzichtet werden, wenn die Teilnehmer reziproke Schwellwertstrategien spielen. (2) Weiterhin ist das genutzte Verfahren, also die Untersuchung eines Systems mittels verhaltensökonomischen Experimenten, spieltheoretischen Modellen und Simulationen, auch für die Entwicklung anderer verteilter, koordinationsfreier Systeme sinnvoll. So kann auf Annahmen bezüglich des Verhaltens der Teilnehmer verzichtet werden. Die erzielten Ergebnisse sind zuverlässiger als Validierungen von Systemen unter ausschließlichem Einsatz einiger weniger vom Entwickler vorgegebener Strategien.

Das gewählte Vorgehen bietet damit einen großen Vorteil gegenüber existierenden Arbeiten zur Untersuchung des Freifahrerverhaltens in strukturierten Peer-to-Peer Systemen. Bisher wurde bei entsprechenden Untersuchungen primär auf die Erwartungen des Entwicklers bezüglich der auftretenden Strategien zurückgegriffen. So gingen beispielsweise viele Untersuchungen mit

Simulationen von altruistischen Strategien kooperativer Teilnehmer aus (siehe z.B. [BuB04b, BLV05]). Obwohl solche Strategien durchaus auch in verhaltensökonomischen Experimenten beobachtet wurden (siehe z.B. [FeS99]), existieren Szenarien, in welchen kein altruistisches Verhalten beobachtet werden kann, so wie in den hier untersuchten strukturierten Peer-to-Peer Systemen. Es ist sinnvoll, in Simulationen nur die Strategien zu berücksichtigen, die auch tatsächlich auftreten. Dasselbe gilt auch für spieltheoretische Modelle. Deshalb sind verhaltensökonomische Modelle stets der erste Schritt für die Untersuchung verteilter, koordinierer-freier Systeme. Nach Abschluss der verhaltensökonomischen Experimente bietet sich die spieltheoretische Modellierung der Ergebnisse an. Auf Basis dieser Modelle lassen sich schließlich zuverlässige Vorhersagen über erfolgreiche Strategien machen. Um Änderungen in der Population näher zu untersuchen, bieten sich schließlich Simulationen an. Mit ihrer Hilfe lässt sich der Strategiemix im untersuchten verteilten System leicht variieren.

## 7.2 Ausblick

Im Folgenden wird ein kurzer Ausblick über interessante Folgearbeiten gegeben.

**Netzwerkbildung:** In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Interaktion ausschließlich mit kooperativen Kontakten schon zu stabilen Systemen führt. Allerdings können die Teilnehmer in dem hier untersuchten Szenario ihre Kontakte nicht auswählen. Dies ist insbesondere für die Teilnehmer problematisch, die Freifahrer als Kontakte besitzen: Sie können oft ihre Anfragen entweder über den kürzesten Weg oder an kooperative Kontakte weiterleiten. Hartmann et al. [HBK07] schlagen für inhaltsadressierbare Netze vor, neben den existierenden Kontakten weitere Kontakte für die Weiterleitung zu nutzen. Dieser Ansatz bietet hohes Potenzial für die Robustheit solcher Systeme in Gegenwart vieler Freifahrer.

**Einfügen von Inhalten:** Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich auf die Motivation der Teilnehmer zur aktiven Teilnahme am Bearbeiten von Anfragen untersucht. Dies ist jedoch nur ein Aspekt in strukturierten Peer-to-Peer Systemen. Mindestens ebenso wichtig ist das Einfügen von Informationen in solche Systeme. Dies sollte in der Zukunft untersucht werden. Hier ist insbesondere wichtig, wie Teilnehmer dazu bewegt werden können, Inhalte einzubringen, wie sichergestellt werden kann, dass die eingefügten Inhalte wertvoll sind und welchen Einfluss das Einfügen unsinniger Inhalte auf das Gesamtsystem besitzt.

**Feldstudie:** Während in dieser Arbeit der Erfolg unterschiedlicher, menschlicher Strategien in strukturierten Peer-to-Peer Systemen untersucht wurde, ist noch offen, wie sich entsprechende Teilnehmer in Feldstudien verhalten. Hierfür sollte ein strukturiertes Peer-to-Peer System entwickelt werden, das für den Austausch richtiger Daten geeignet ist. In diesem System sollten reziproke Schwellwertstrategien zum Einsatz kommen. Mit einem solchen System könnte geprüft werden, ob die in dieser Arbeit getroffenen Vorhersagen auch in der Praxis gelten.

**Übertragung der Methode:** Der Einsatz von verhaltensökonomischen Experimenten zur Untersuchung des Verhaltens von Softwareartefakten in verteilten, koordiniererfreien Systemen ist neu. Bisher bauen die meisten Arbeiten in diesem Bereich auf fiktiven Angriffen auf. Es ist zu prüfen, in wie weit sich das hier benutzte Vorgehen auch auf andere Systeme, wie beispielsweise Adhoc Netzwerke, übertragen lässt und ob dieser Ansatz auch helfen kann, solche Systeme besser zu verstehen.

## **Anhang A – Verhaltensökonomische Experimente**

Dieser Anhang enthält detaillierte Informationen zu den verhaltensökonomischen Experimenten. In Anhang A.1 werden die Spielbeschreibungen der einzelnen Experimente aufgeführt. Die Anhänge A.2 bis A.4 enthalten Detailergebnisse der einzelnen Experimentreihen.

### **Anhang A.1 – Spielbeschreibungen**

Dieser Anhang enthält die Spielbeschreibungen, die während der verhaltensökonomischen Experimente an die Teilnehmer ausgegeben wurden. Soweit für die einzelnen Untersuchungen der Experimentreihen Änderungen an den Spielbeschreibungen notwendig waren, sind diese aufgelistet.

#### **Experimentreihe Eigene Beobachtung**

Herzlich willkommen. Sie nehmen an einem Spiel über Entscheidungen bei Unsicherheit teil.

Sie nehmen an einem Spiel teil, in dem Sie mit Personen und Computern interagieren. Ihre Auszahlung bestimmt sich im Wesentlichen daraus, wie viele Namen-Zahlenkombinationen Sie in Erfahrung bringen. Dieses erfolgt im Einzelnen wie folgt.

Sie sitzen während des Spiels an einem Rechner, dem zwei Listen bekannt sind, Liste A und Liste B. Liste A enthält 200 Namen. Zu jedem dieser Namen auf der Liste gehört eine Zahl, die einem Ihrer Mitspieler oder einem Rechner bekannt ist. Wer die fehlende Zahl kennt, wird zufällig vor Spielbeginn bestimmt. Liste B besteht aus 200 Namen und 200 Zahlen, die einander zugeordnet sind. Dieses sind die Namen-Zahlenkombinationen, die Ihnen bekannt sind, Ihnen zufällig zugeordnet wurden, und nach denen Sie von anderen gefragt werden könnten. Weiterhin sind Ihnen zu Beginn einige andere Teilnehmer bekannt, in der Regel vier, jeweils beschrieben durch eine Kennzahl. Jeder der anderen (Personen oder Rechner) erhält wie Sie zwei Listen. Jedesmal, wenn Ihnen eine Anfrage gestellt wird, überprüft das System automatisch, ob die gesuchte Namen-Zahlenkombination auf Ihrer Liste B steht, und teilt Ihnen dies mit.

Die Zahlen zu den Namen auf Liste A können Sie über Anfragen in Erfahrung bringen. Ihre Anfrage stellen Sie an einen beliebigen anderen Teilnehmer (Rechner oder Person), der wie Sie durch eine Kennzahl charakterisiert ist. Zu Beginn kennen Sie nur ca. vier Teilnehmer. Wenn Sie einen Namen auf Ihrem Bildschirm eingeben, für den Sie die zugehörige Zahl nicht kennen, schlägt Ihnen das System eine Reihung Ihnen bekannter Teilnehmer vor. Die Reihenfolge orientiert sich daran, ob ein Teilnehmer die Ihnen fehlende Zahl haben könnte: Der erstgenannte Teilnehmer ist am geeignetsten, der zweitgenannte am zweitgeeignetsten, usw. Es ist aber nicht sicher, dass einer der Teilnehmer die Zahl tatsächlich hat. Sollte der Teilnehmer die Zahl zu dem Namen Ihrer Anfrage nicht besitzen, kann er Ihre Anfrage weiterleiten. Das System bietet ihm auch wieder mehrere Teilnehmer an. Anfragen müssen nicht beantwortet oder weitergeleitet werden. Dies entscheidet jeder Teilnehmer für sich. Wenn ein Teilnehmer eine Anfrage beantwortet, schickt er das Ergebnis direkt an den Anfrager. Falls eine Ihrer Anfragen beantwortet wird, registriert Ihr System, an welchen Teilnehmer Sie Ihre Anfrage ursprünglich weitergeleitet hatten, und wer ihre Anfrage weitergeleitet und beantwortet hat. Ein Teilnehmer ist meist für ähnliche Namen zuständig. Ähnlich sind Namen, wenn Sie im Alphabet nahe beieinander stehen.

Genau wie Sie kann jemand anderes seine Kombination erfragen und hat dabei dieselben Möglichkeiten wie Sie und erhält die gleichen Informationen. Ankommende Anfragen können Sie

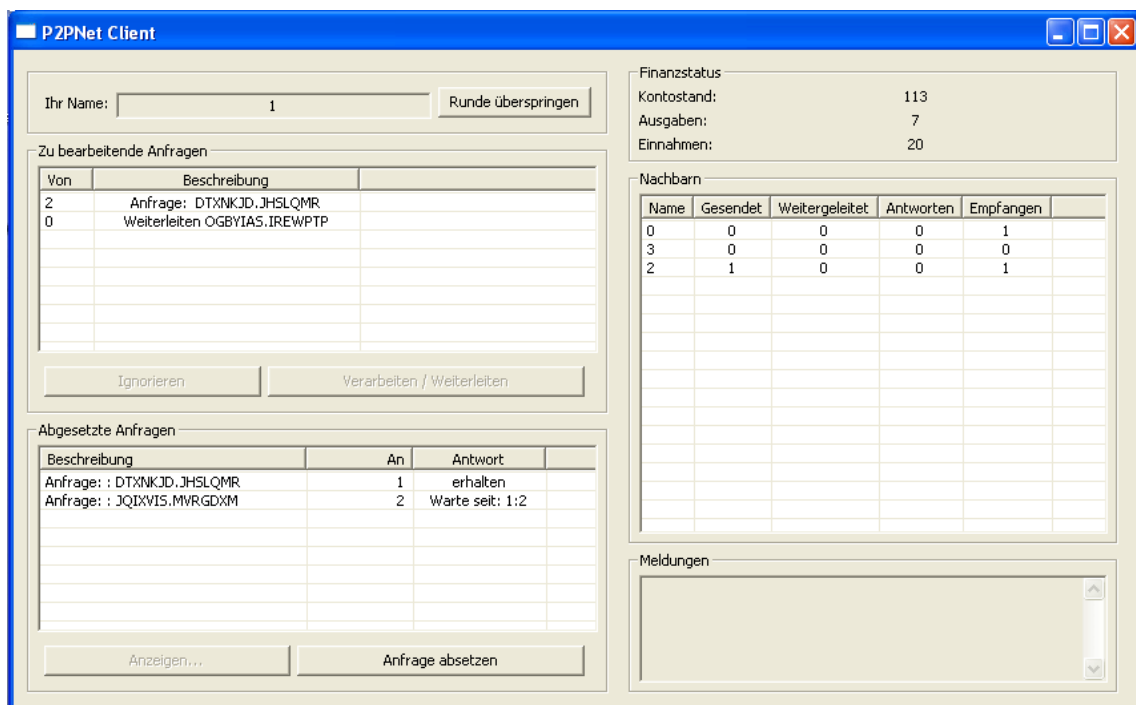
also beantworten, weiterleiten oder ignorieren. Bei Eingang einer Anfrage teilt Ihnen Ihr System mit, ob Sie die Anfrage aufgrund der Ihnen bekannten 200 Namen und Zahlenkombinationen beantworten können oder nicht.

Für jede Namen-/Zahlenkombination von Liste A erhalten Sie 20 Punkte. Die Beantwortung einer fremden Anfrage kostet Sie 5 Punkte. Eigene Anfragen absenden kostet 2 Punkte. Weiterleiten kostet 1 Punkt. Nichtstun, d. h. die Anfrage ignorieren, kostet nichts. Ihr Kontostand zu Spielbeginn beträgt 100 Punkte.

Ihr Punktestand wird nach jeder Runde angepasst. Pro Spielrunde können sie maximal eine Aktion ausführen, die Kosten verursacht. Wollen Sie in einer Runde keine solche Aktion durchführen, so können Sie die Runde auch überspringen.

Ihre Spielpartner treffen Entscheidungen wie Sie, die Rechner verhalten sich entsprechend eines Programms, das sie nicht kennen.

Die Spiele erfolgen über den folgenden Bildschirm. Dort sind Ihre Informationen und Aktionsmöglichkeiten wie folgt angeordnet:



Ganz oben links auf dem Bildschirm steht ihre Kennung. Bitte merken Sie sie sich, da danach ausbezahlt wird. Neben Ihrer Kennung befindet sich der Button „Runde überspringen“. Er erlaubt es Ihnen, eine Runde zu beenden, ehe Sie eine kostenverursachende Aktion durchgeführt haben.

Der restliche Bildschirm gliedert sich im Wesentlichen in fünf Bereiche:

Oben-links: Hier geben Sie ein, wie Sie mit einer erhaltenen Anfrage umgehen: Beantworten, falls dies Ihnen möglich ist, Weiterleiten oder Ignorieren.

Unten-links: Hier stellen Sie Ihre Anfragen, indem Sie einen Namen und einen Teilnehmer angeben, an den die Anfrage geht. Als Teilnehmer, an die Sie Anfragen richten können, stehen

Ihnen die Teilnehmer zur Verfügung, mit denen Sie in der Vergangenheit bereits zu tun hatten. Sie sind unterschiedlich geeignet, je nach angefragtem Namen. Sie können Ihre Anfrage an einen beliebigen Teilnehmer stellen. Ein Teilnehmer ist meist für ähnliche Namen zuständig. Ähnlich sind Namen, wenn sie im Alphabet nahe beieinander stehen

Oben-rechts: Hier ist Ihr Kontostand aufgeführt. Er ergibt sich aus Ihren Einnahmen aus Namen-/Zahlenkombinationen und Ihren Ausgaben für das Stellen von Anfragen und das Beantworten oder Weiterleiten von Anfragen.

Mitte-rechts: Hier wird Ihnen zum einen angezeigt, über welchen Teilnehmer, an den Sie eine Anfrage gestellt haben, Sie eine Zahl bekommen haben und über welchen nicht. Die Beantwortung Ihrer Anfrage muss nicht durch diesen Teilnehmer erfolgt sein, sondern kann sich auch durch eine Weiterleitung ergeben haben. Zum anderen wird Ihnen angezeigt, welcher Teilnehmer wie viele Ihrer Anfragen beantwortet hat und von welchen Teilnehmern Sie wie viele Anfragen erhalten haben.

Unten-rechts: Hier werden Systemmeldungen ausgegeben.

Das Spiel dauert sicher 5 Minuten. Innerhalb der nächsten 10 Minuten wird es dann zufällig beendet. Ihre Auszahlung ist Ihr Kontostand bei Spielende.

## **Experimentreihe Feedback**

### **Untersuchung Feedback**

Herzlich willkommen. Sie nehmen an einem Spiel über Entscheidungen bei Unsicherheit teil.

Sie nehmen an einem Spiel teil, in dem Sie mit Personen und Computern interagieren. Ihre Auszahlung bestimmt sich im Wesentlichen daraus, wie viele Namen-Zahlenkombinationen Sie in Erfahrung bringen. Dieses geschieht im Einzelnen wie folgt.

Zu Beginn dieses Spiels bekommen sie zwei Listen: Liste A und Liste B. Auf Liste A befinden sich 200 Namen (längere Buchstabenkombinationen). Zu jedem dieser Namen auf der Liste gehört eine Zahl, die einem Ihrer Mitspieler oder einem Rechner bekannt ist. Wer die fehlende Zahl kennt, wird zufällig vor Spielbeginn bestimmt. Auf Liste B befinden sich 200 Namen und 200 Zahlen, die einander zugeordnet sind. Dieses sind die Namen-Zahlenkombinationen, die Ihnen bekannt sind, Ihnen zufällig zugeordnet wurden, und nach denen Sie von anderen gefragt werden könnten. Weiterhin sind Ihnen einige andere Teilnehmer bekannt, in der Regel vier, jeweils beschrieben durch eine Kennzahl. Jeder der anderen (Personen oder Rechner) erhält wie Sie zwei Listen. Liste B ist in Ihrem System abgelegt. Damit Sie nicht immer suchen müssen, ob Sie eine Kombination kennen, überprüft das Ihr System bei Anfragen automatisch und teilt Ihnen das Ergebnis mit.

Die Zahlen zu den Namen auf Ihrer Liste (Liste A) können Sie über Anfragen in Erfahrung bringen. Ihre Anfrage stellen Sie an einen der Ihnen bekannten anderen Teilnehmer (Rechner oder Person), der wie Sie durch eine Kennzahl charakterisiert ist. Wenn Sie eine Anfrage starten, arbeitet das System ihre Liste automatisch ab. Bei der Eingabe eines Namens auf Ihrem Bildschirm, für den Sie die zugehörige Zahl nicht kennen, schlägt Ihnen das System eine Reihenfolge von Ihnen bekannten Teilnehmern vor. Die Reihenfolge orientiert sich daran, ob ein Teilnehmer die Ihnen fehlende Zahl haben könnte: Der erstgenannte Teilnehmer ist am geeignetsten, der zweitgenannte am zweitgeeignetsten, usw. Es ist aber nicht sicher, dass einer der Teil-

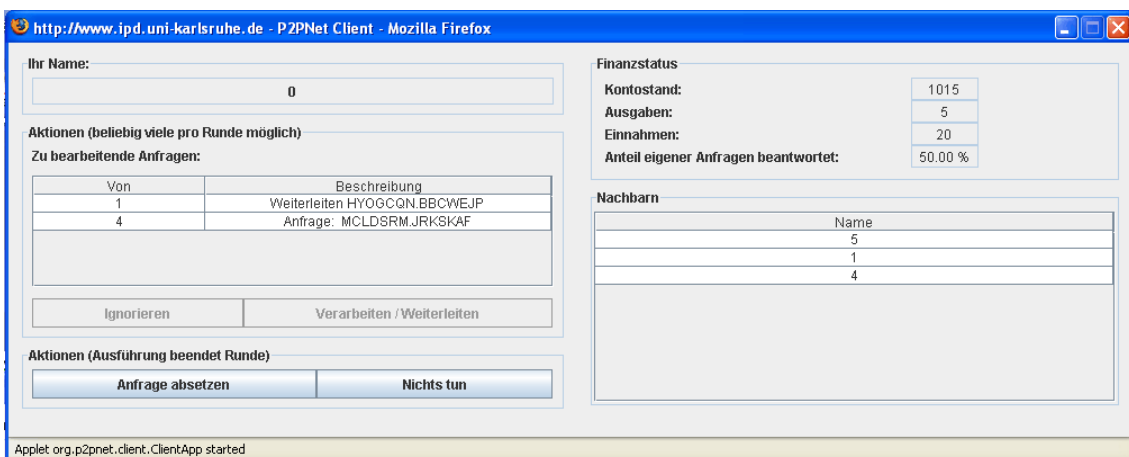
nehmer die Zahl tatsächlich hat. Sollte der Teilnehmer die Zahl zu dem Namen Ihrer Anfrage nicht besitzen, kann er Ihre Anfrage weiterleiten. Das System bietet ihm auch wieder eine Reihung ihm bekannter Teilnehmer an. Anfragen müssen nicht beantwortet oder weitergeleitet werden. Dies entscheidet jeder Teilnehmer für sich. Wenn ein Teilnehmer eine Anfrage beantwortet, schickt er das Ergebnis direkt an den Anfrager. Falls eine Ihrer Anfragen beantwortet wird, registriert Ihr System, an welchen der Ihnen bekannten Teilnehmer Sie ihre Anfrage ursprünglich weitergeleitet hatten. Genau wie Sie kann jemand anderes seine Kombination erfragen und hat dabei dieselben Möglichkeiten wie Sie und erhält die gleichen Informationen. Ankommende Anfragen können Sie also beantworten, nicht beantworten oder weiterleiten. Bei Eingang einer Anfrage teilt Ihnen Ihr System mit, ob Sie die Anfrage aufgrund der dem System bekannten 200 Namen und Zahlenkombinationen beantworten können oder nicht.

Für jede Namen-/Zahlenkombination von Liste A erhalten Sie 20 Punkte. Die Beantwortung einer fremden Anfrage kostet Sie 5 Punkte. Eigene Anfragen absenden kostet 2 Punkte. Weiterleiten kostet 1 Punkt. Nichtstun, d. h. die Anfrage ignorieren, kostet nichts. Ihr Punktestand wird nach jeder Aktion angepasst. Ihr Kontostand zu Spielbeginn beträgt 100 Punkte. Der Wert von 1 Punkt beträgt 2 Cent.

Ihre Spielpartner treffen Entscheidungen wie Sie, die Rechner verhalten sich entsprechend eines Programms, das sie nicht kennen.

In diesem Spiel können Sie nach einer Aktion Feedback über einen Teilnehmer verschicken (und alle anderen über Sie auch). Positives Feedback bedeutet, dass die Interaktion mit diesem Teilnehmer von Ihnen positiv beurteilt wird, und negatives Feedback, dass sie die Interaktion negativ beurteilen.

Die Spiele erfolgen über den folgenden Bildschirm, dort sind ihre Informationen und Aktionsmöglichkeiten wie folgt angeordnet:



Ganz oben links auf dem Bildschirm steht ihre Kennung, die Sie sich bitte merken, da danach ausbezahlt wird.

Der restliche Bildschirm gliedert sich im Wesentlichen in vier Bereiche:

Oben-links: Tabelle aller eingehenden Anfragen. Mit den Buttons darunter geben Sie ein, wie Sie mit einer erhaltenen Anfrage umgehen: Verarbeiten/Weiterleiten (welche der beiden Optionen auf sie zutrifft, ist in der darüber stehenden Tabelle aufgeführt) oder Ignorieren.

Unten-links: Hier stellen Sie Ihre Anfragen, indem Sie auf den „Anfrage absetzen“ Button klicken. Dann öffnet sich ein Fenster, in dem Sie einen Namen und einen Teilnehmer angeben, an den die Anfrage geht. Als Teilnehmer, an die Sie Anfragen richten können, stehen Ihnen immer dieselben Teilnehmer zur Verfügung, die unterschiedlich geeignet sind, je nach angefragtem Namen. In der Tabelle wird Ihnen der Status Ihrer offenen Anfragen angezeigt.

Oben-rechts: Hier ist Ihr Kontostand aufgeführt, entsprechend Einnahmen aus Namen-/Zahlenkombinationen und Ausgaben für das Stellen von Anfragen und das Beantworten oder Weiterleiten von Anfragen.

Rechts unten sind die Feedback-Spalten aufgeführt, in der alle Feedbacks, die Sie erhalten und vergeben haben, aufsummiert sind.

Das Spiel wird in Runden durchgeführt. Eine Runde ist dann abgeschlossen, wenn jeder Teilnehmer eine Anfrage abgesendet hat oder auf den „Nichts tun“ Button geklickt hat.

**Wichtig:** Wenn Sie also Anfragen in einer Runde bearbeiten wollen, müssen sie dies tun, bevor Sie eine eigene Abfrage absetzen. Informationen über beantwortete Anfragen werden sofort weitergegeben.

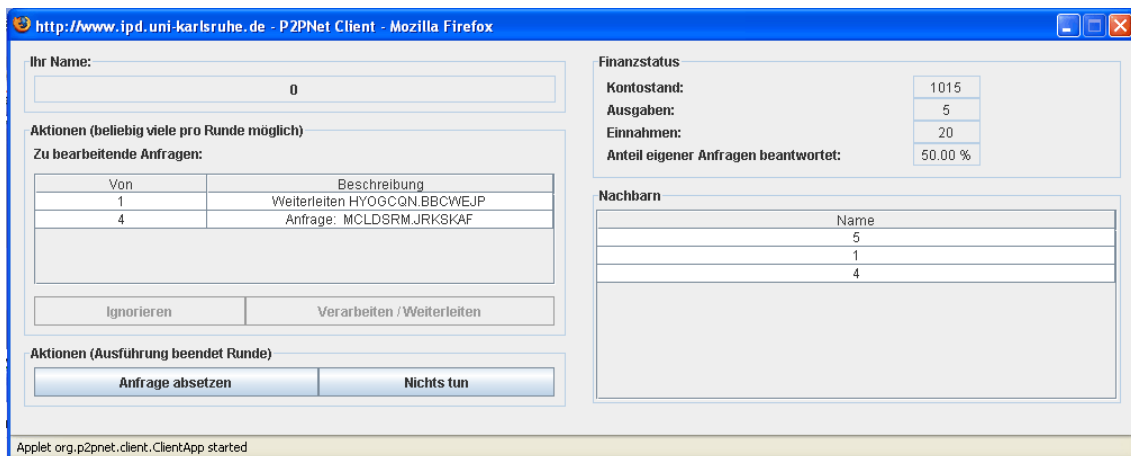
Das Spiel dauert sicher 20 Runden. Danach wird jede Runde gewürfelt, ob das Spiel abbricht. Falls eine 6 kommt, wird abgebrochen, sonst wird die nächste Runde gespielt.

Zu Beginn spielen wir Proberunden, um Sie mit dem System vertraut zu machen.

### Untersuchung Vertrauen – Modifikation

Im nächsten Spiel ist Feedback nicht möglich.

Der Bildschirm sieht in diesem Spiel wie folgt aus:



### Experimentreihe Heterogenität

Herzlich willkommen. Sie nehmen an drei Spielen über Entscheidungen bei Unsicherheit teil.

Sie nehmen an einem Spiel teil, in dem Sie mit Personen und Computern interagieren. Ihre Auszahlung bestimmt sich im Wesentlichen daraus, wie viele Namen-Zahlenkombinationen Sie in Erfahrung bringen. Dieses geschieht im Einzelnen wie folgt.

## Untersuchung Standard

Zu Beginn dieses Spiels bekommen sie zwei Listen: Liste A und Liste B. Auf Liste A befinden sich 200 Namen (längere Buchstabenkombinationen). Zu jedem dieser Namen auf der Liste gehört eine Zahl, die einem Ihrer Mitspieler bekannt ist. Wer die fehlende Zahl kennt, wird zufällig vor Spielbeginn bestimmt. Auf Liste B befinden sich 200 Namen und 200 Zahlen, die einander zugeordnet sind. Dieses sind die Namen-Zahlenkombinationen, die Ihnen bekannt sind, Ihnen zufällig zugeordnet wurden, und nach denen Sie von anderen gefragt werden könnten. Weiterhin sind Ihnen einige andere Teilnehmer bekannt, in der Regel vier, jeweils beschrieben durch eine Kennzahl. Jeder der anderen (Personen oder Rechner) erhält wie Sie zwei Listen. Liste B ist in Ihrem System abgelegt. Damit Sie nicht immer suchen müssen, ob Sie eine Kombination kennen, überprüft das Ihr System bei Anfragen automatisch und teilt Ihnen das Ergebnis mit.

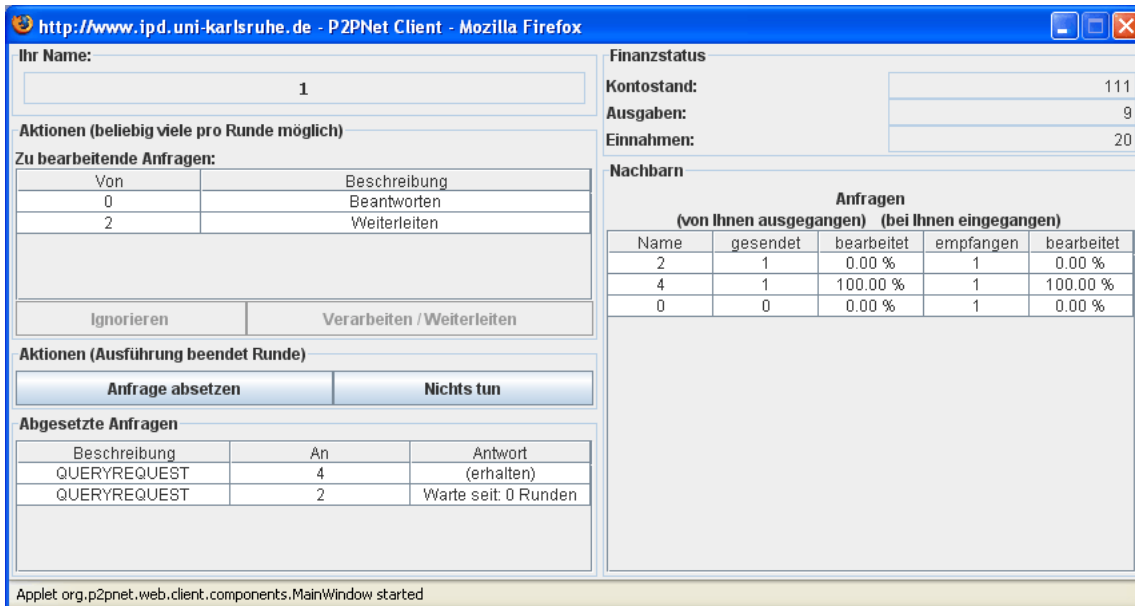
Die Zahlen zu den Namen auf Ihrer Liste (Liste A) können Sie über Anfragen in Erfahrung bringen. Ihre Anfrage stellen Sie an einen der Ihnen bekannten anderen Teilnehmer (Rechner oder Person), der wie Sie durch eine Kennzahl charakterisiert ist. Wenn Sie eine Anfrage starten, arbeitet das System ihre Liste automatisch ab. Bei der Eingabe eines Namens auf Ihrem Bildschirm, für den Sie die zugehörige Zahl nicht kennen, schlägt Ihnen das System eine Reihenfolge von Ihnen bekannten Teilnehmern vor. Die Reihenfolge orientiert sich daran, ob ein Teilnehmer die Ihnen fehlende Zahl haben könnte: Der erstgenannte Teilnehmer ist am geeignetsten, der zweitgenannte am zweitgeeignetsten, usw. Es ist aber nicht sicher, dass einer der Teilnehmer die Zahl tatsächlich hat. Sollte der Teilnehmer die Zahl zu dem Namen Ihrer Anfrage nicht besitzen, kann er Ihre Anfrage weiterleiten. Das System bietet ihm auch wieder eine Reihung ihm bekannter Teilnehmer an. Anfragen müssen nicht beantwortet oder weitergeleitet werden. Dies entscheidet jeder Teilnehmer für sich. Wenn ein Teilnehmer eine Anfrage beantwortet, schickt er das Ergebnis direkt an den Anfrager. Falls eine Ihrer Anfragen beantwortet wird, registriert Ihr System, an welchen der Ihnen bekannten Teilnehmer Sie ihre Anfrage ursprünglich weitergeleitet hatten. Genau wie Sie kann jemand anderes seine Kombination erfragen und hat dabei dieselben Möglichkeiten wie Sie und erhält die gleichen Informationen. Ankommende Anfragen können Sie also beantworten, nicht beantworten oder weiterleiten. Bei Eingang einer Anfrage teilt Ihnen Ihr System mit, ob Sie die Anfrage aufgrund der dem System bekannten 200 Namen und Zahlenkombinationen beantworten können oder nicht.

Für jede Namen-/Zahlenkombination von Liste A erhalten Sie 20 Punkte. Die Beantwortung einer fremden Anfrage kostet Sie 5 Punkte. Eigene Anfragen absenden kostet 2 Punkte. Weiterleiten kostet 1 Punkt. Nichtstun, d. h. die Anfrage ignorieren, kostet nichts. Ihr Punktestand wird nach jeder Aktion angepasst. Ihr Kontostand zu Spielbeginn beträgt 100 Punkte. Der Wert von 1 Punkt beträgt 2 Cent.

Ihre Spielpartner treffen Entscheidungen wie Sie, die Rechner verhalten sich entsprechend eines Programms, das sie nicht kennen.

Die Spiele erfolgen über den folgenden Bildschirm, dort sind Ihre Informationen und Aktionsmöglichkeiten wie folgt angeordnet:





Ganz oben links auf dem Bildschirm steht ihre Kennung, die Sie sich bitte merken, da danach ausbezahlt wird.

Der restliche Bildschirm gliedert sich im Wesentlichen in vier Bereiche:

Oben-links: Tabelle aller eingehenden Anfragen. Mit den Buttons darunter geben Sie ein, wie Sie mit einer erhaltenen Anfrage umgehen: Verarbeiten/Weiterleiten (welche der beiden Optionen auf sie zutrifft, ist in der darüber stehenden Tabelle aufgeführt) oder Ignorieren.

Unten-links: Hier stellen Sie Ihre Anfragen, indem Sie auf den Anfrage absetzen Button klicken. Dann öffnet sich ein Fenster, in dem Sie einen Namen und einen Teilnehmer angeben, an den die Anfrage geht. Als Teilnehmer, an die Sie Anfragen richten können, stehen Ihnen immer dieselben Teilnehmer zur Verfügung, die unterschiedlich geeignet sind, je nach angefragtem Namen. In der Tabelle wird Ihnen der Status Ihrer offenen Anfragen angezeigt.

Unten-rechts: Hier wird Ihnen angezeigt, wie viel Anfragen Sie an einen bestimmten Teilnehmer gesendet haben und wie viel dieser bearbeitet hat. Ebenso ist aufgeführt, wie viele Anfragen Sie von einem Teilnehmer erhalten haben und wie viel Prozent Sie davon beantwortet haben.

Oben-rechts: Hier ist Ihr Kontostand aufgeführt, entsprechend Einnahmen aus Namen-/Zahlenkombinationen und Ausgaben für das Stellen von Anfragen und das Beantworten oder Weiterleiten von Anfragen.

Das Spiel wird in Runden durchgeführt. Eine Runde ist dann abgeschlossen, wenn jeder Teilnehmer eine Anfrage abgesendet hat oder auf den „Nichts tun“ Button geklickt hat.

**Wichtig:** Wenn Sie also Anfragen in einer Runde bearbeiten wollen, müssen sie dies tun, bevor Sie eine eigene Abfrage absetzen. Informationen über beantwortete Anfragen werden sofort weitergegeben.

Das Spiel dauert sicher 20 Runden. Danach wird jede Runde gewürfelt, ob das Spiel abbricht. Falls eine 6 kommt, wird abgebrochen, sonst wird die nächste Runde gespielt.

### **Untersuchung ohne Information – Modifikation**

Der Spieler mit dem erhöhten Gewinn (100 statt 20) erkennt dies daran, dass "100" hinter seinem Namen steht. Alle anderen wissen nicht, wer der Spielpartner mit dem Gewinn von "100" ist.

### **Untersuchung ohne Feedback – Modifikation**

Sie spielen das zweite Spiel noch einmal. Dabei können Ihre Position, Ihre Mitspieler und der "100"er Spieler wechseln.

Vor Spielbeginn wird angesagt, wer der "100"er Spieler ist.

## Anhang A.2 – Experimentreihe Eigene Beobachtungen – Detaillerggebnisse

In diesem Anhang werden die Detaillerggebnisse der Experimentreihe Eigene Beobachtung beschrieben. Sie bilden die Grundlage für die Ergebnisse in Abschnitt 3.3.1.

### Entwicklung der Auszahlung

Die folgenden Tabellen enthalten die Auszahlungen der Teilnehmer in den gespielten Runden.

#### Untersuchung Standard – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	24	42	33	45	37	35	51	69
Teiln. B	-2	-9	9	7	20	38	91	84	97	95
Teiln. C	-2	-4	29	46	59	47	65	97	89	82
Teiln. D	-2	11	19	37	55	73	65	82	80	78
Teiln. E	-2	15	23	11	9	1	-7	-14	4	4
Teiln. F	-2	13	11	6	19	38	36	36	29	29
Mittel	-2,00	6,17	19,17	24,83	32,50	40,33	47,83	53,33	58,33	59,50

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	86	99	97	108	120	138	126	144	157	155
Teiln. B	107	102	95	108	145	141	179	177	190	190
Teiln. C	74	92	130	137	154	146	154	152	150	168
Teiln. D	76	73	71	109	102	100	93	91	89	109
Teiln. E	-4	14	11	4	12	9	49	49	47	39
Teiln. F	64	57	52	65	60	73	88	81	80	73
Mittel	67,17	72,83	76,00	88,50	98,83	101,17	114,83	115,67	118,83	122,33

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	153	151	169	185
Teiln. B	183	203	201	200
Teiln. C	203	191	204	202
Teiln. D	102	100	118	116
Teiln. E	37	75	63	61
Teiln. F	92	85	85	78
Mittel	128,33	134,17	140,00	140,33

#### Untersuchung Standard – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-9	-11	-11	-11	-11	-13	-13	-13
Teiln. B	0	0	-2	-2	-12	-12	-12	-12	-12	-12
Teiln. C	-2	-4	-6	-9	3	16	34	25	22	40
Teiln. D	-2	-4	14	27	40	53	51	69	66	64
Teiln. E	-2	-5	-12	3	21	19	14	12	12	12
Teiln. F	-7	-10	8	6	24	22	20	18	16	9
Mittel	-2,50	-4,50	-1,17	2,33	10,83	14,50	16,00	16,50	15,17	16,67

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-20	-20	-2	-4	14	12	10	3	1	1
Teiln. B	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-14	-14
Teiln. C	53	44	51	42	74	67	85	103	101	118
Teiln. D	62	59	56	74	67	85	73	86	99	112
Teiln. E	10	10	5	2	2	22	15	33	31	23
Teiln. F	27	45	63	60	52	44	56	64	77	75
Mittel	20,00	21,00	26,83	27,00	32,83	36,33	37,83	46,17	49,17	52,50

### Untersuchung Standard – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	4	2	20	18	16	7	6	23
Teiln. B	-2	-10	-10	-12	-17	-24	-6	-11	8	-2
Teiln. C	-2	-4	14	12	5	18	16	49	47	65
Teiln. D	-2	11	4	36	54	66	63	81	73	91
Teiln. E	-2	18	16	24	17	37	34	27	27	25
Teiln. F	-2	-9	29	27	44	41	34	52	50	43
Mittel	-2,00	3,67	9,50	14,83	20,50	26,00	26,17	34,17	35,17	40,83

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	21	34	34	31	31	24	64	62	57	57
Teiln. B	-5	15	7	0	20	13	33	31	46	59
Teiln. C	58	56	54	62	55	68	61	79	92	110
Teiln. D	108	106	123	135	133	146	144	136	174	187
Teiln. E	18	18	15	35	28	48	41	41	41	34
Teiln. F	76	69	67	100	118	136	129	127	120	118
Mittel	46,00	49,67	50,00	60,50	64,17	72,50	78,67	79,33	88,33	94,17

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	57	57	57	54	54
Teiln. B	59	54	54	54	52
Teiln. C	108	106	124	122	115
Teiln. D	207	220	213	231	223
Teiln. E	32	47	40	33	53
Teiln. F	111	129	147	145	163
Mittel	95,67	102,17	105,83	106,50	110,00

### Untersuchung Standard – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	29	27	40	58	76	93	111	109
Teiln. B	-2	-9	29	22	39	51	44	56	49	41
Teiln. C	-2	-5	10	8	27	20	28	16	11	29
Teiln. D	-2	-9	-2	-5	-12	6	23	60	78	96
Teiln. E	-2	15	18	36	28	16	28	16	36	24
Teiln. F	-2	-4	14	10	7	24	21	39	32	50
Mittel	-2,00	0,67	16,33	16,33	21,50	29,17	36,67	46,67	52,83	58,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	126	124	142	155	153	166	204	197	210	222
Teiln. B	54	47	64	62	100	110	102	140	149	161
Teiln. C	44	39	37	69	62	62	75	68	61	81
Teiln. D	114	132	129	127	124	136	148	141	179	197
Teiln. E	42	39	32	50	46	44	52	70	70	84
Teiln. F	33	51	42	60	52	50	62	60	53	41
Mittel	68,83	72,00	74,33	87,17	89,50	94,67	107,17	112,67	120,33	131,00

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	240	233	230	247	255
Teiln. B	177	170	167	162	200
Teiln. C	71	109	102	102	140
Teiln. D	215	222	239	231	243
Teiln. E	93	91	82	81	76
Teiln. F	54	86	104	116	104
Mittel	141,67	151,83	154,00	156,50	169,67

### Untersuchung Standard – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	24	36	34	30	43	59	77	90
Teiln. B	-2	-9	9	6	14	1	34	30	18	56
Teiln. C	-2	-5	8	6	21	38	66	54	87	100
Teiln. D	-2	11	-1	-2	11	7	24	22	40	38
Teiln. E	-2	15	28	26	19	37	40	38	76	69
Teiln. F	-2	11	28	40	57	54	65	82	65	58
Mittel	-2,00	5,67	16,00	18,67	26,00	27,83	45,33	47,50	60,50	68,50

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	88	141	158	164	182	195	207	208	225	242
Teiln. B	69	77	69	72	80	113	129	162	175	188
Teiln. C	113	121	119	112	125	133	150	163	146	159
Teiln. D	38	37	35	53	71	79	76	109	127	140
Teiln. E	67	80	78	116	134	147	145	142	180	180
Teiln. F	56	69	82	100	118	135	123	136	129	137
Mittel	71,83	87,50	90,17	102,83	118,33	133,67	138,33	153,33	163,67	174,33

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	254	267	283	283	283
Teiln. B	185	202	220	216	229
Teiln. C	177	190	183	175	183
Teiln. D	138	136	134	153	151
Teiln. E	178	171	169	184	184
Teiln. F	130	128	121	119	137
Mittel	177,00	182,33	185,00	188,33	194,50

### Untersuchung Standard – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-10	8	0	17	15	26	22	38	36
Teiln. B	-2	-4	-11	-13	5	2	15	7	5	-2
Teiln. C	-2	-4	-7	-10	-17	-19	-31	-13	-20	-22
Teiln. D	-2	16	34	32	50	48	66	84	82	100
Teiln. E	-2	-4	-12	-14	-17	-19	-2	-7	-12	-12
Teiln. F	-2	11	7	24	12	12	8	8	28	27
Mittel	-2,00	0,83	3,17	3,17	8,33	6,50	13,67	16,83	20,17	21,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	53	51	48	46	44	32	50	83	101	98
Teiln. B	-4	-6	-8	-10	-12	6	3	23	16	16
Teiln. C	-24	-31	-13	-15	-22	11	-1	-8	-10	8
Teiln. D	98	96	94	94	92	110	130	128	126	119
Teiln. E	-12	-12	-12	-12	-15	-15	-15	-15	-16	-16
Teiln. F	20	40	35	32	52	45	60	53	52	52
Mittel	21,83	23,00	24,00	22,50	23,17	31,50	37,83	44,00	44,83	46,17

### Untersuchung Standard – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	34	27	24	21	14	11	9	2
Teiln. B	-2	-9	29	26	39	57	69	62	70	65
Teiln. C	-2	-5	-12	-15	3	-4	33	21	34	47
Teiln. D	-2	16	14	12	10	28	46	84	142	140
Teiln. E	-3	-3	-15	-17	-24	-32	-43	-25	-33	-15
Teiln. F	-2	-9	-12	5	18	15	12	10	3	21
Mittel	-2,17	1,00	6,33	6,33	11,67	14,17	21,83	27,17	37,50	43,33

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	0	-7	11	9	2	-5	-7	26	24	62
Teiln. B	83	91	108	101	94	107	104	87	86	78
Teiln. C	34	86	81	98	116	128	146	139	135	152
Teiln. D	138	136	134	152	190	208	206	204	202	200
Teiln. E	-15	-18	-18	-25	-27	-35	-37	-9	-11	-19
Teiln. F	38	36	24	22	14	32	25	83	81	89
Mittel	46,33	54,00	56,67	59,50	64,83	72,50	72,83	88,33	86,17	93,67

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	75	93	91	89
Teiln. B	78	71	70	68
Teiln. C	165	177	194	186
Teiln. D	198	196	194	194
Teiln. E	-21	-28	-30	-12
Teiln. F	86	104	97	95
Mittel	96,83	102,17	102,67	103,33

### Untersuchung Standard – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	9	4	1	20	35	33	51	48
Teiln. B	-2	-9	9	26	38	54	67	85	97	95
Teiln. C	-2	-4	-10	-11	-14	-20	-2	-8	-23	-25
Teiln. D	-2	-4	-7	13	11	24	22	19	57	55
Teiln. E	-2	-4	-7	-19	-21	-13	-15	-22	-4	14
Teiln. F	-2	16	13	30	43	40	78	96	89	80
Mittel	-2,00	1,00	1,17	7,17	9,67	17,50	30,83	33,83	44,50	44,50

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	68	66	64	55	75	88	86	99	107	145
Teiln. B	83	100	113	125	142	155	171	177	195	208
Teiln. C	-17	-22	-25	-27	-7	10	7	7	20	17
Teiln. D	73	71	89	87	84	82	80	97	95	113
Teiln. E	32	30	23	21	14	7	5	3	16	34
Teiln. F	92	105	118	135	122	120	113	111	139	117
Mittel	55,17	58,33	63,67	66,00	71,67	77,00	77,00	82,33	95,33	105,67

Runde	21	22
Teiln. A	143	156
Teiln. B	224	242
Teiln. C	15	10
Teiln. D	131	129
Teiln. E	17	35
Teiln. F	135	128
Mittel	110,83	116,67

### Untersuchung Standard – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	-1	-5	-8	-10	-10	9	9	9
Teiln. B	-2	-5	-13	-15	-2	16	28	46	59	52
Teiln. C	-2	-5	13	50	55	48	46	28	41	39
Teiln. D	-2	16	14	27	40	53	71	89	87	85
Teiln. E	0	0	-2	-15	3	21	14	7	21	40
Teiln. F	-2	10	27	24	22	13	11	29	27	25
Mittel	-1,67	1,17	6,33	11,00	18,33	23,50	26,67	34,67	40,67	41,67

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	7	3	0	-3	-6	-13	1	-6	2	-1
Teiln. B	70	108	126	123	176	169	207	245	233	231
Teiln. C	32	25	23	35	53	66	58	56	56	56
Teiln. D	103	101	98	116	134	151	148	165	163	180
Teiln. E	39	37	30	19	37	35	54	43	63	56
Teiln. F	18	11	9	29	17	35	23	36	89	101
Mittel	44,83	47,50	47,67	53,17	68,50	73,83	81,83	89,83	101,00	103,83

Runde	21	22
Teiln. A	-4	16
Teiln. B	244	242
Teiln. C	94	92
Teiln. D	177	175
Teiln. E	49	49
Teiln. F	94	87
Mittel	109,00	110,17

### Untersuchung Standard – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-2	-4	12	12	9	6	6	4	2
Teiln. B	-2	-2	-4	-12	-12	-19	-11	-19	-19	-19
Teiln. C	-2	-4	14	12	9	6	4	22	20	18
Teiln. D	-2	11	18	36	29	27	40	37	36	29
Teiln. E	-2	16	29	22	40	37	54	47	44	62
Teiln. F	-2	-9	-10	-12	-15	5	3	23	23	18
Mittel	-2,00	1,67	7,17	9,67	10,50	10,83	16,00	19,33	18,00	18,33

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-3	15	13	12	9	27	20	19	12	10
Teiln. B	-36	-38	-41	-43	-25	-27	-34	-34	-21	-21
Teiln. C	36	34	32	30	68	66	84	101	118	116
Teiln. D	67	65	63	60	53	49	62	74	72	88
Teiln. E	80	73	73	70	71	63	81	79	77	90
Teiln. F	18	18	16	16	14	14	14	9	9	4
Mittel	27,00	27,83	26,00	24,17	31,67	32,00	37,83	41,33	44,50	47,83

Runde	21	22	23
Teiln. A	10	3	1
Teiln. B	-23	-23	-23
Teiln. C	114	112	110
Teiln. D	86	103	100
Teiln. E	87	102	100
Teiln. F	2	2	2
Mittel	46,00	49,83	48,33

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-7	-9	-10	-17	2	21	14	13	10
Teiln. B	-2	-4	14	11	24	39	25	43	61	54
Teiln. C	-2	-4	9	7	-1	17	34	26	21	59
Teiln. D	-2	11	3	1	19	11	9	26	23	23
Teiln. E (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	6	24	22	20
Teiln. F	-2	11	9	6	39	29	29	22	19	12
Mittel	-2,00	1,40	5,20	3,00	12,80	19,60	23,60	26,20	27,40	31,60
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	6	24	22	20

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	8	23	23	23	22	15	30	23	16	36
Teiln. B	72	91	86	84	84	84	82	100	113	111
Teiln. C	49	54	73	73	68	88	76	74	67	107
Teiln. D	21	39	37	35	43	41	59	57	95	108
Teiln. E (Freif.)	18	16	14	12	30	28	66	64	62	80
Teiln. F	29	37	34	32	50	47	40	38	66	43
Mittel	35,80	48,80	50,60	49,40	53,40	55,00	57,40	58,40	71,40	81,00
Mittel (Freif.)	18	16	14	12	30	28	66	64	62	80

Runde	21	22
Teiln. A	31	51
Teiln. B	146	140
Teiln. C	105	104
Teiln. D	105	98
Teiln. E (Freif.)	78	76
Teiln. F	56	74
Mittel	88,60	93,40
Mittel (Freif.)	78	76

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	-12	-14	-14	-15	-15	-17	-19	-19
Teiln. B	-2	-2	-4	14	12	10	5	23	21	39
Teiln. C	-2	-2	-4	-4	-4	-4	-5	-10	-10	-12
Teiln. D (Freif.)	-2	16	34	32	30	28	26	44	42	40
Teiln. E	-2	-4	-11	-18	-20	-22	-9	4	21	14
Teiln. F	-2	10	7	5	2	0	18	11	3	1
Mittel	-2,00	-1,40	-4,80	-3,40	-4,80	-6,20	-1,20	2,20	3,20	4,60
Mittel (Freif.)	-2	16	34	32	30	28	26	44	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-26	-26	-28	-28	-35	-37	-37	-24	-26	-8
Teiln. B	37	35	33	31	29	22	20	20	20	20
Teiln. C	-12	-12	-12	-12	-14	6	3	3	-4	-4
Teiln. D (Freif.)	58	56	54	52	70	68	66	64	62	60
Teiln. E	27	24	22	19	17	15	28	21	34	52
Teiln. F	-1	-3	-5	-7	-9	-11	2	20	38	26
Mittel	5,00	3,60	2,00	0,60	-2,40	-1,00	3,20	8,00	12,40	17,20
Mittel (Freif.)	58	56	54	52	70	68	66	64	62	60

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	-10	-12	-12	-14	6	4	2	-5	-5	-7
Teiln. B	20	20	18	18	18	16	14	12	10	10
Teiln. C	-4	-4	-9	-9	-9	-9	-11	-11	-13	-13
Teiln. D (Freif.)	58	56	56	56	54	52	50	48	46	46
Teiln. E	45	43	41	34	52	50	43	41	39	32
Teiln. F	44	42	60	78	66	64	82	100	98	116
Mittel	19,00	17,80	19,60	21,40	26,60	25,00	26,00	27,40	25,80	27,60
Mittel (Freif.)	58	56	56	56	54	52	50	48	46	46



Runde	31	32	33
Teiln. A	-7	-9	-9
Teiln. B	10	8	8
Teiln. C	-15	-15	-15
Teiln. D (Freif.)	46	44	42
Teiln. E	30	23	21
Teiln. F	114	132	130
Mittel	26,40	27,80	27,00
Mittel (Freif.)	46	44	42

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	29	21	36	33	32	25	24	41
Teiln. B	-2	-9	9	6	1	-2	-5	15	13	10
Teiln. C	-2	-4	9	27	20	18	33	31	30	23
Teiln. D	-2	-9	-2	16	28	26	44	42	40	38
Teiln. E	-2	15	23	15	28	26	19	16	14	7
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	12	50	48	46	44	42	60
Mittel	-2,00	0,80	13,60	17,00	22,60	20,20	24,60	25,80	24,20	23,80
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	50	48	46	44	42	60

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	34	54	53	51	46	46	39	59	59	59
Teiln. B	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Teiln. C	21	21	19	19	16	14	7	7	7	2
Teiln. D	36	33	31	24	42	40	38	31	29	67
Teiln. E	24	22	20	39	39	36	54	67	64	57
Teiln. F (Freif.)	58	56	54	52	50	48	66	64	62	60
Mittel	24,60	26,20	24,80	26,80	28,80	27,40	27,80	33,00	32,00	37,20
Mittel (Freif.)	58	56	54	52	50	48	66	64	62	60

Runde	21	22	23
Teiln. A	59	58	51
Teiln. B	1	1	1
Teiln. C	0	0	0
Teiln. D	65	83	81
Teiln. E	55	48	68
Teiln. F (Freif.)	58	56	54
Mittel	36,00	38,00	40,20
Mittel (Freif.)	58	56	54

#### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	16	34	32	50	68	86	84	122	120
Teiln. B	-2	-9	-12	-15	-17	-19	-27	-34	-22	-25
Teiln. C	-2	-5	-7	-9	-16	-24	-38	-20	-32	-34
Teiln. D	-2	11	28	21	33	29	49	45	45	43
Teiln. E	-2	15	3	21	34	30	28	26	41	59
Teiln. F	-2	-7	-9	-11	-11	-14	6	4	19	12
Mittel	-2,00	1,00	0,60	1,40	4,60	0,40	3,60	4,20	10,20	11,00
Mittel (Freif.)	-2	16	34	32	50	68	86	84	122	120

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	118	136	134	152	150	168	166	164	182	180
Teiln. B	-7	-14	-17	-24	-26	-8	-10	8	21	13
Teiln. C	-41	-48	-50	-57	-59	-76	-78	-78	-78	-80
Teiln. D	40	38	56	54	49	67	65	62	55	53
Teiln. E	71	69	66	64	84	83	81	78	98	98
Teiln. F	25	43	36	55	53	68	66	61	54	74
Mittel	17,60	17,60	18,20	18,40	20,20	26,80	24,80	26,20	30,00	31,60
Mittel (Freif.)	118	136	134	152	150	168	166	164	182	180

Runde	21	22	23	24
Teiln. A (Freif.)	178	176	194	192
Teiln. B	26	23	36	34
Teiln. C	-60	-63	-63	-24
Teiln. D	53	53	45	38
Teiln. E	91	91	89	87
Teiln. F	74	72	85	78
Mittel	36,80	35,20	38,40	42,60
Mittel (Freif.)	178	176	194	192

#### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	9	22	19	15	28	26	63	81
Teiln. B	-2	-9	-11	-13	-5	-8	0	-9	-26	-33
Teiln. C	-2	-5	13	11	24	17	9	2	-3	15
Teiln. D	-2	11	3	0	18	35	52	70	87	104
Teiln. E (Freif.)	-2	18	16	16	14	12	30	48	66	66
Teiln. F	-2	11	8	20	33	30	28	26	24	12
Mittel	-2,00	3,80	4,40	8,00	17,80	17,80	23,40	23,00	29,00	35,80
Mittel (Freif.)	-2	18	16	16	14	12	30	48	66	66

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	79	77	110	122	139	132	150	138	155	173
Teiln. B	-35	-17	-29	-31	-13	0	8	26	19	57
Teiln. C	2	-5	13	11	8	21	39	37	34	32
Teiln. D	122	120	118	156	154	167	185	182	180	180
Teiln. E (Freif.)	66	66	64	62	82	82	80	80	78	76
Teiln. F	45	57	70	88	71	104	92	110	108	91
Mittel	42,60	46,40	56,40	69,20	71,80	84,80	94,80	98,60	99,20	106,60
Mittel (Freif.)	66	66	64	62	82	82	80	80	78	76

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	193	193	193	193
Teiln. B	49	47	60	58
Teiln. C	32	29	29	27
Teiln. D	180	178	178	178
Teiln. E (Freif.)	74	74	94	92
Teiln. F	106	103	98	95
Mittel	112,00	110,00	111,60	110,20
Mittel (Freif.)	74	74	94	92

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	10	8	21	19	16	12	10	8	25
Teiln. B	-2	-9	-12	-19	-21	-23	-24	-26	-28	-28
Teiln. C	-2	-4	-4	-5	-6	14	12	10	9	2
Teiln. D	-2	-9	-11	-13	-20	-7	-9	-11	-13	3
Teiln. E (Freif.)	-2	16	14	32	50	48	46	44	44	44
Teiln. F	-2	16	13	28	24	17	17	15	14	7
Mittel	-2,00	0,80	-1,20	2,40	-0,80	3,40	1,60	-0,40	-2,00	1,80
Mittel (Freif.)	-2	16	14	32	50	48	46	44	44	44

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	22	19	14	12	10	8	16	34	26	43
Teiln. B	-30	-30	-12	-19	-19	-21	-1	-8	10	3
Teiln. C	0	-1	-8	12	11	11	9	7	5	5
Teiln. D	1	-1	-3	-5	-7	-22	-29	-11	-13	-17
Teiln. E (Freif.)	42	60	78	76	76	94	94	94	92	92
Teiln. F	7	0	0	0	0	0	17	10	8	8
Mittel	0,00	-2,60	-1,80	0,00	-1,00	-4,80	2,40	6,40	7,20	8,40
Mittel (Freif.)	42	60	78	76	76	94	94	94	92	92

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	36	36	34	33
Teiln. B	23	43	41	39
Teiln. C	5	0	0	0
Teiln. D	-19	-21	-23	-23
Teiln. E (Freif.)	92	90	90	88
Teiln. F	8	8	6	6
Mittel	10,60	13,20	11,60	11,00
Mittel (Freif.)	92	90	90	88

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	15	3	1	-1	-3	-5	-7	12	12
Teiln. B	-2	-10	8	1	-6	-18	-25	-27	-40	-42
Teiln. C	-2	-4	9	6	23	41	39	31	29	17
Teiln. D	-2	-9	-21	-23	-25	-28	-11	6	24	21
Teiln. E (Freif.)	-2	16	34	52	50	68	66	64	62	60
Teiln. F	-2	-4	34	32	30	28	26	24	22	60
Mittel	-2,00	-2,40	6,60	3,40	4,20	4,00	4,80	5,40	9,40	13,60
Mittel (Freif.)	-2	16	34	52	50	68	66	64	62	60

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	10	10	8	3	3	1	21	20	18	16
Teiln. B	-9	-16	-23	-10	-12	-14	-21	-23	-25	-32
Teiln. C	20	13	10	27	24	17	15	33	29	48
Teiln. D	19	37	34	27	24	42	40	32	30	23
Teiln. E (Freif.)	58	56	74	72	70	68	66	64	62	60
Teiln. F	78	96	94	112	110	108	106	104	102	120
Mittel	23,60	28,00	24,60	31,80	29,80	30,80	32,20	33,20	30,80	35,00
Mittel (Freif.)	58	56	74	72	70	68	66	64	62	60

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	14	14	9	9
Teiln. B	-34	-36	-18	-20
Teiln. C	47	47	47	44
Teiln. D	20	18	16	14
Teiln. E (Freif.)	58	56	54	52
Teiln. F	118	116	114	112
Mittel	33,00	31,80	33,60	31,80
Mittel (Freif.)	58	56	54	52

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	9	21	18	15	32	30	28	46
Teiln. B (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	28	26	44	42	40
Teiln. C	-2	-4	14	12	10	8	1	-1	-3	-3
Teiln. D	-2	16	9	27	25	23	21	19	17	15
Teiln. E	-2	-5	8	1	1	-7	-12	-19	-21	-21
Teiln. F	-2	-9	-11	2	0	-7	11	9	7	0
Schnitt	-2,00	-1,20	5,80	12,60	10,80	6,40	10,60	7,60	5,60	7,40
Schnitt (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	28	26	44	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	64	62	60	53	70	88	86	79	77	74
Teiln. B (Freif.)	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20
Teiln. C	-5	-7	-9	-11	7	5	3	1	19	17
Teiln. D	13	11	9	7	0	-12	6	-1	-8	-10
Teiln. E	-28	-30	-32	-13	-15	-17	-25	-5	13	6
Teiln. F	-2	-4	-6	-8	-15	3	16	34	27	45
Schnitt	8,40	6,40	4,40	5,60	9,40	13,40	17,20	21,60	25,60	26,40
Schnitt (Freif.)	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	72	70	68	66
Teiln. B (Freif.)	18	16	14	12
Teiln. C	15	13	11	9
Teiln. D	-12	-14	-16	-18
Teiln. E	4	22	20	13
Teiln. F	43	36	34	52
Schnitt	24,40	25,40	23,40	24,40
Schnitt (Freif.)	18	16	14	12

### Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	29	21	38	36	33	50	67	85
Teiln. B	-2	-4	-11	-13	0	8	5	18	11	24
Teiln. C	-2	-5	-7	-9	-16	-8	-10	-23	-35	-38
Teiln. D (Freif.)	-2	16	34	32	50	68	66	104	102	100
Teiln. E	-2	-2	-14	-16	-23	-3	-6	-18	-20	-7
Teiln. F	-2	10	7	25	38	35	33	50	88	80
Mittel	-2,00	-2,00	0,80	1,60	7,40	13,60	11,00	15,40	22,20	28,80
Mittel (Freif.)	-2	16	34	32	50	68	66	104	102	100

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	83	76	108	104	117	130	127	160	153	170
Teiln. B	42	78	70	67	100	92	100	92	110	128
Teiln. C	-56	-44	-32	-39	-41	-43	-6	-13	-17	-19
Teiln. D (Freif.)	118	116	114	112	110	108	106	124	122	140
Teiln. E	-11	9	27	44	55	73	85	104	104	102
Teiln. F	112	99	92	103	111	122	145	152	150	132
Mittel	34,00	43,60	53,00	55,80	68,40	74,80	90,20	99,00	100,00	102,60
Mittel (Freif.)	118	116	114	112	110	108	106	124	122	140

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	168	186	179	176	174
Teiln. B	146	144	162	160	178
Teiln. C	-21	-33	-35	-37	-39
Teiln. D (Freif.)	138	136	134	132	130
Teiln. E	89	109	107	105	98
Teiln. F	151	151	151	151	151
Mittel	106,60	111,40	112,80	111,00	112,40
Mittel (Freif.)	138	136	134	132	130

## Untersuchung mit Freifahrer – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	14	12	30	28	46	44	44	32
Teiln. B	-2	-4	14	12	10	7	0	-2	-4	34
Teiln. C	-2	-5	-7	-9	-16	-23	-30	-12	-14	-21
Teiln. D	-2	-9	9	27	40	57	74	70	67	65
Teiln. E	-2	16	-1	-8	4	2	0	-7	-11	-13
Teiln. F (Freif.)	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-4	-6	12
Mittel	-2,00	-1,20	5,80	6,80	13,60	14,20	18,00	18,60	16,40	19,40
Mittel (Freif.)	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-4	-6	12

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	30	23	21	19	17	15	15	13	11	9
Teiln. B	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14
Teiln. C	-23	-5	-7	-9	-17	-19	-26	-33	-20	-22
Teiln. D	64	64	61	58	56	54	47	45	38	33
Teiln. E	-16	-16	-16	-19	-19	-21	-3	15	22	15
Teiln. F (Freif.)	10	10	8	6	26	24	44	42	62	80
Mittel	17,40	19,20	17,40	15,00	12,20	10,20	10,60	11,60	13,40	9,80
Mittel (Freif.)	10	10	8	6	26	24	44	42	62	80

Runde	21	22	23	24	25	26	27
Teiln. A	2	0	-2	-4	-11	-13	-20
Teiln. B	12	9	7	7	7	7	7
Teiln. C	-14	4	-3	-5	-12	-14	-17
Teiln. D	31	47	43	62	60	56	74
Teiln. E	33	21	39	32	70	68	66
Teiln. F (Freif.)	98	98	98	98	98	96	96
Mittel	12,80	16,20	16,80	18,40	22,80	20,80	22,00
Mittel (Freif.)	98	98	98	98	98	96	96

## Ergebnis des Strategiespiels

Während des Strategiespiels wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Strategien mit eigenen Worten zu beschreiben.

**Basisstrategie:** Auf Basis des Strategiespiels konnte eine Basisstrategie identifiziert werden. Teilnehmer, die der Basisstrategie folgen, zeigen reziprokes Verhalten. Wenn sie einkommende Anfragen erhalten (Anfragen zum Weiterleiten oder Beantworten), beantworten sie diese, wenn der Absender mehr als  $x$  Prozent der eigenen Anfragen beantwortet hatte. Teilnehmer folgen dieser Strategie, wenn  $x$  größer oder gleich 80 ist. Als Empfänger ihrer Nachrichten wählen Teilnehmer, die dieser Strategie folgen, Kontakte, die mehr als  $y$  Prozent ihrer Anfragen bearbeitet hatten (mit  $y > 50$ ). Außerdem bevorzugen sie als Empfänger Teilnehmer, welche dem Anfragepunkt nahe liegen.

**Startphase:** Ein Teilnehmer nutzt eine Startphase, wenn er in den ersten Runden einer Untersuchung alle Anfragen beantwortet.

**Endphase:** Ein Teilnehmer spielt eine Endphase, wenn er am Ende einer Untersuchung keine Anfragen mehr bearbeitet.

**Benutzte Strategien:** Im Folgenden werden für jeden Teilnehmer die Strategien angegeben, die er während des Strategiespiels nutzte. Dabei werden nur die Teilnehmer berücksichtigt, die nicht instruiert worden waren, sich als Freifahrer zu verhalten. Die Teilnehmer werden mit Buchstaben von A bis F bezeichnet. Die folgenden Tabellen zeigen alle Teilnehmer und deren eingesetzten Strategien. Alle Teilnehmer beschrieben nur eine Strategie für alle Untersuchungen in Experimentreihe Eigenen Beobachtung.

**Häufigste Strategie:** Die meisten Teilnehmer spielten die Basisstrategie zusammen mit einer Startphase.

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	A, B, C, D, F	5
2	C, D, E	3
3	A, C, D, E, F	5
4	A, B, C, D, F	5
5	A, B, F	3
6	B, F	2
7	A, B, C, D, E	5
8	B, F	2
9	A, C, D, E, F	5
10	A, B, C, D, E, F	6
<b>Summe</b>		<b>41</b>

**Modifikationen:** Alle anderen Teilnehmer spielten Modifikationen der Basisstrategie mit einer Startphase. Die Modifikationen sind im Einzelnen:

2.) Einsatz einer Endphase

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
5	D, E	2
8	A	1
<b>Summe</b>		<b>3</b>

3.) Absolute Werte für x und y an Stelle relativer Werte

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
5	C	1
6	A, D	2
<b>Summe</b>		<b>3</b>

4.) Ausreißer für x und y ( $x = y = 1/3$ )

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	E	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

5.) Anfragen zufällig weitergeleitet

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	F	1
3	B	1
4	E	1
6	C	1
<b>Summe</b>		<b>4</b>

6.) Einschränkung: Beantworten weniger Anfragen für Andere als eigene Antworten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	A, B	2
9	B	1
<b>Summe</b>		<b>3</b>

7.) Antworten nur bei wiederholten Anfragen

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
6	E	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

8.) Stets Antworten und nie Weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
8	E	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

9.) Zufälliges Verschicken von Anfragen, sonst reziprokes Weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
8	D	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

10.) Nur Abschicken von Anfragen in der Startphase, dann reziprokes Verhalten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
7	F	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

11.) Reziprokes Verhalten, bis Auszahlung kleiner 50

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
8	C	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

## Anhang A.3 – Experimentreihe Feedback – Detailergebnisse

Im Folgenden werden die Detailergebnisse der Experimentreihe Feedback beschrieben. Sie bilden die Grundlage für die Ergebnisse in Abschnitt 3.3.2.

### Entwicklung der Auszahlung

Die folgenden Tabellen enthalten die Auszahlungen der Teilnehmer in den gespielten Runden.

#### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	8	6	42	35	33	66	63	61
Teiln. B	-2	-9	28	39	32	49	46	59	72	65
Teiln. C	-2	16	2	-5	1	-6	-15	-28	-11	-20
Teiln. D	-2	-4	-6	-11	-13	5	3	16	9	2
Teiln. E	-2	11	8	7	0	13	6	19	12	49
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	12	30	30	68	86	104	122
Mittel	-2,00	5,00	8,00	7,20	12,40	19,20	14,60	26,40	29,00	31,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	12	30	30	68	86	104	122

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	58	51	68	65	63	56	74	88	80	77
Teiln. B	63	80	93	90	83	121	118	110	126	138
Teiln. C	-23	-26	-28	-10	-14	-21	-24	-37	-19	-7
Teiln. D	20	38	31	23	21	14	12	30	22	15
Teiln. E	42	34	47	60	53	66	59	77	74	67
Teiln. F (Freif.)	120	118	116	114	152	170	168	166	164	202
Mittel	32,00	35,40	42,20	45,60	41,20	47,20	47,80	53,60	56,60	58,00
Mittel (Freif.)	120	118	116	114	152	170	168	166	164	202

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	70	68	62	60	48	41	41	40	40	40
Teiln. B	130	146	142	154	167	165	162	160	198	211
Teiln. C	-14	-26	-33	-35	-2	-10	-22	-29	-36	-23
Teiln. D	33	46	39	37	75	73	91	88	86	84
Teiln. E	85	83	100	113	106	124	142	140	133	131
Teiln. F (Freif.)	220	238	256	254	252	270	268	286	284	282
Mittel	60,80	63,40	62,00	65,80	78,80	78,60	82,80	79,80	84,20	88,60
Mittel (Freif.)	220	238	256	254	252	270	268	286	284	282

Runde	31
Teiln. A	40
Teiln. B	229
Teiln. C	-35
Teiln. D	102
Teiln. E	129
Teiln. F (Freif.)	280
Mittel	93,00
Mittel (Freif.)	280

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	9	2	0	-2	-4	-8	-10	-13
Teiln. B	-2	-4	-17	-19	-21	-23	-27	-29	-23	-30
Teiln. C	0	-2	13	13	6	3	2	21	20	17
Teiln. D	-2	-4	16	12	9	27	23	36	29	42
Teiln. E	-2	-10	-12	-14	5	-3	-6	-13	0	-2
Teiln. F (Freif.)	-2	16	34	52	50	48	46	44	82	100
Mittel	-1,60	-1,80	1,80	-1,20	-0,20	0,40	-2,40	1,40	3,20	2,80
Mittel (Freif.)	-2	16	34	52	50	48	46	44	82	100

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-15	-17	-20	-28	5	2	-2	-4	14	31
Teiln. B	-32	-32	-28	-30	-17	-19	-21	-23	-5	-7
Teiln. C	15	13	8	6	24	24	22	20	8	21
Teiln. D	59	57	49	63	55	53	70	67	64	57
Teiln. E	-8	-10	27	18	5	-3	-10	-10	3	18
Teiln. F (Freif.)	98	96	114	132	150	168	166	164	162	160
Mittel	3,80	2,20	7,20	5,80	14,40	11,40	11,80	10,00	16,80	24,00
Mittel (Freif.)	98	96	114	132	150	168	166	164	162	160

Runde	21	22	23	24	25	26
Teiln. A	29	27	25	22	40	57
Teiln. B	-9	9	7	25	23	21
Teiln. C	19	12	12	5	0	-7
Teiln. D	55	46	44	42	40	33
Teiln. E	18	18	18	18	17	16
Teiln. F (Freif.)	158	176	174	172	170	188
Mittel	22,40	22,40	21,20	22,40	24,00	24,00
Mittel (Freif.)	158	176	174	172	170	188

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	2	20
Teiln. B	0	0	-3	-3	-5	-8	-8	-10	-12	2
Teiln. C	-2	-2	-8	-16	-16	-17	-17	-19	-21	-23
Teiln. D	0	-2	18	18	16	16	14	14	12	12
Teiln. E	-2	-6	-8	9	6	4	1	-2	-4	-12
Teiln. F	-2	-4	-6	-9	-9	-10	-10	-13	-20	-21
Mittel	-1,20	-2,80	-1,40	-0,20	-1,60	-3,00	-4,00	-6,00	-9,00	-8,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	2	20

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	18	16	34	32	50	48	46	64	62	60
Teiln. B	2	0	-5	13	8	8	6	6	-1	-1
Teiln. C	-28	-30	-12	-15	-17	-18	-18	-20	-2	16
Teiln. D	10	8	28	26	26	24	44	44	44	44
Teiln. E	-15	-17	-24	-32	-20	-23	-25	-32	-34	-36
Teiln. F	-1	-4	-11	-11	-13	-13	-19	-21	-21	-26
Mittel	-6,40	-8,60	-4,80	-3,80	-3,20	-4,40	-2,40	-4,60	-2,80	-0,60
Mittel (Freif.)	18	16	34	32	50	48	46	64	62	60

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28
Teiln. A (Freif.)	78	96	94	92	90	88	106	104
Teiln. B	-1	-1	-1	-1	-1	-3	-8	12
Teiln. C	14	11	10	8	21	14	14	8
Teiln. D	42	42	42	42	40	60	60	58
Teiln. E	-43	-51	-53	-55	-42	-44	-47	-49
Teiln. F	-28	-29	-30	-32	-32	-32	-33	-35
Mittel	-3,20	-5,60	-6,40	-7,60	-2,80	-1,00	-2,80	-1,20
Mittel (Freif.)	78	96	94	92	90	88	106	104



### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	15	13	10	27	44	42	40	38	34
Teiln. B	0	-7	6	3	-5	-8	-10	-18	-20	-20
Teiln. C	-2	-5	-13	-15	-7	-10	-17	-4	8	23
Teiln. D	-2	-4	14	12	29	47	60	57	45	58
Teiln. E	-2	-4	9	5	-3	-15	17	15	32	25
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	-8	10	8	6	24	42	40
Mittel	-1,60	-1,00	5,80	3,00	8,20	11,60	18,40	18,00	20,60	24,00
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	10	8	6	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	52	45	62	55	52	50	48	47	45	43
Teiln. B	-23	-5	-7	-9	9	7	5	23	21	59
Teiln. C	41	37	30	48	64	62	60	57	69	56
Teiln. D	51	49	42	40	33	31	29	22	20	18
Teiln. E	12	9	25	17	10	8	5	3	16	13
Teiln. F (Freif.)	58	56	54	72	70	68	66	64	62	60
Mittel	26,60	27,00	30,40	30,20	33,60	31,60	29,40	30,40	34,20	37,80
Mittel (Freif.)	58	56	54	72	70	68	66	64	62	60

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	36	53	50	67	84	102	100	98	95	88
Teiln. B	51	48	41	59	77	75	73	90	107	104
Teiln. C	73	64	82	73	81	79	95	87	75	73
Teiln. D	56	44	42	40	33	31	29	27	40	33
Teiln. E	5	2	15	7	0	-7	-14	-17	-19	18
Teiln. F (Freif.)	58	96	94	92	110	108	106	104	122	120
Mittel	44,20	42,20	46,00	49,20	55,00	56,00	56,60	57,00	59,60	63,20
Mittel (Freif.)	58	96	94	92	110	108	106	104	122	120

Runde	31
Teiln. A	85
Teiln. B	102
Teiln. C	65
Teiln. D	31
Teiln. E	14
Teiln. F (Freif.)	138
Mittel	59,40
Mittel (Freif.)	138

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	18	18	11	6	-3	-8	-14	-16	3
Teiln. B	0	-12	-14	-16	-19	-21	-34	-14	-4	9
Teiln. C	-2	16	14	12	-6	11	29	61	54	47
Teiln. D	0	-2	-5	12	29	26	19	32	49	62
Teiln. E (Freif.)	-2	-4	-6	12	30	28	86	84	102	120
Teiln. F	-2	-4	-6	-13	24	19	31	39	51	44
Mittel	-1,20	3,20	1,40	1,20	6,80	6,40	7,40	20,80	26,80	33,00
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	12	30	28	86	84	102	120

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	3	3	1	-4	-11	-23	-25	-28	-33	-38
Teiln. B	1	19	17	25	43	36	34	34	28	47
Teiln. C	40	33	50	48	86	104	122	138	134	137
Teiln. D	75	68	61	74	67	64	57	50	67	67
Teiln. E (Freif.)	138	156	154	172	170	168	186	184	202	220
Teiln. F	62	59	72	104	97	135	127	123	120	138
Mittel	36,20	36,40	40,20	49,40	56,40	63,20	63,00	63,40	63,20	70,20
Mittel (Freif.)	138	156	154	172	170	168	186	184	202	220

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	-40	-45	-25	-26	-6	-6	-6	-8	-13	-14
Teiln. B	45	45	43	58	51	51	49	44	42	35
Teiln. C	130	127	120	158	156	154	142	155	148	186
Teiln. D	64	57	47	45	64	58	75	68	81	94
Teiln. E (Freif.)	238	256	254	272	270	268	266	304	322	320
Teiln. F	135	153	170	153	143	143	161	174	190	183
Mittel	66,80	67,40	71,00	77,60	81,60	80,00	84,20	86,60	89,60	96,80
Mittel (Freif.)	238	256	254	272	270	268	266	304	322	320

Runde	31
Teiln. A	-14
Teiln. B	35
Teiln. C	182
Teiln. D	87
Teiln. E (Freif.)	318
Teiln. F	201
Mittel	98,20
Mittel (Freif.)	318

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	16	34	32	50	48	66	84	82	100
Teiln. B	-2	-4	-11	-15	-25	-27	-28	-36	-36	-41
Teiln. C	-2	-4	-4	-7	10	22	15	7	39	33
Teiln. D	-2	-5	-9	-11	-16	-23	-25	-33	-21	-3
Teiln. E	-2	-9	-11	-14	4	22	20	38	31	44
Teiln. F	-2	-6	-9	-13	-20	-22	-24	-6	-8	-10
Mittel	-2,00	-5,60	-8,80	-12,00	-9,40	-5,60	-8,40	-6,00	1,00	4,60
Mittel (Freif.)	-2	16	34	32	50	48	66	84	82	100

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	98	96	114	112	130	148	166	184	202	200
Teiln. B	-54	-54	-61	-61	-23	-5	-12	-19	-31	-33
Teiln. C	26	59	47	59	69	83	80	98	110	107
Teiln. D	35	51	43	56	44	37	45	43	56	53
Teiln. E	42	35	73	85	103	91	109	122	120	118
Teiln. F	22	15	33	45	33	47	45	38	56	53
Mittel	14,20	21,20	27,00	36,80	45,20	50,60	53,40	56,40	62,20	59,60
Mittel (Freif.)	98	96	114	112	130	148	166	184	202	200

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A (Freif.)	218	216	214	232	250	268	266	264	262	260
Teiln. B	5	-2	16	14	27	17	12	5	3	0
Teiln. C	100	113	101	112	108	124	139	132	145	138
Teiln. D	45	38	36	44	52	48	61	59	47	45
Teiln. E	111	149	167	160	158	156	149	167	205	222
Teiln. F	51	49	46	63	61	59	77	95	93	91
Mittel	62,40	69,40	73,20	78,60	81,20	80,80	87,60	91,60	98,60	99,20
Mittel (Freif.)	218	216	214	232	250	268	266	264	262	260

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20
Teiln. B	-2	-2	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-16	-16
Teiln. C	-2	-4	-6	-8	-10	8	6	4	22	40
Teiln. D	-2	16	14	11	29	42	59	56	69	62
Teiln. E	-2	-9	-9	-12	-19	-26	-31	-33	-42	-42
Teiln. F	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-16	-20
Mittel	-2,00	-0,60	-2,60	-5,00	-4,00	0,00	1,20	-1,00	3,40	4,80
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	14	12	10	28	26	44	42	40
Teiln. B	-18	-20	-22	-22	-22	-24	-26	-28	-11	-14
Teiln. C	38	36	34	32	30	28	26	24	42	40
Teiln. D	59	57	43	41	58	56	49	46	44	42
Teiln. E	-45	-50	-52	-56	-57	-69	-72	-80	-85	-85
Teiln. F	-27	-9	9	7	0	18	36	34	27	25
Mittel	1,40	2,80	2,40	0,40	1,80	1,80	2,60	-0,80	3,40	1,60
Mittel (Freif.)	-2	-4	14	12	10	28	26	44	42	40

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A (Freif.)	58	56	54	52	50	68	66	64	62	60
Teiln. B	-16	-18	-20	-23	-25	-27	-27	-27	-27	-27
Teiln. C	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20
Teiln. D	42	40	58	56	54	52	50	43	43	43
Teiln. E	-87	-89	-95	-95	-95	-95	-96	-98	-100	-100
Teiln. F	18	16	14	12	10	3	1	19	17	15
Mittel	-1,00	-3,00	-1,80	-3,60	-5,20	-7,80	-9,20	-7,80	-9,00	-9,80
Mittel (Freif.)	58	56	54	52	50	68	66	64	62	60

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	0	-7	-9	29	22	20	13	13	11	11
Teiln. B	-2	16	8	6	22	19	17	15	8	6
Teiln. C	-2	-4	-6	-13	-18	-18	-20	-20	-20	-22
Teiln. D	-2	16	14	10	28	46	44	41	59	57
Teiln. E	-2	-10	-11	-19	-19	-26	-26	-28	-33	-36
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	14	12	10	8	26	24	42	40
Mittel	-1,60	2,20	-0,80	2,60	7,00	8,20	5,60	4,20	5,00	3,20
Mittel (Freif.)	-2	-4	14	12	10	8	26	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	9	7	7	7	0	20	17	15	28	28
Teiln. B	3	0	-1	-3	-5	-5	-9	-13	-15	-17
Teiln. C	-22	-24	-26	-28	-28	-28	-35	-35	-37	-37
Teiln. D	69	67	64	60	58	56	76	64	62	59
Teiln. E	-43	-43	-46	-48	-33	-40	-47	-29	-36	-36
Teiln. F	58	56	54	52	70	68	86	104	122	120
Mittel	3,20	1,40	-0,40	-2,40	-1,60	0,60	0,40	0,40	0,40	-0,60
Mittel (Freif.)	58	56	54	52	70	68	86	104	122	120

Runde	21	22	23	24	25	26	27
Teiln. A (Freif.)	26	46	39	32	32	25	44
Teiln. B	-20	-27	-29	-31	-33	-40	-42
Teiln. C	-37	-37	-37	-37	-39	-39	-39
Teiln. D	57	55	48	46	44	62	60
Teiln. E	-38	-40	-20	-20	-24	-24	-32
Teiln. F	118	116	134	152	152	168	166
Mittel	-2,40	-0,60	0,20	-2,00	-4,00	-3,20	-1,80
Mittel (Freif.)	118	116	134	152	152	168	166

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	64	62	80
Teiln. B	-2	-9	4	17	9	27	24	41	54	52
Teiln. C	-2	10	21	14	27	14	26	11	45	36
Teiln. D	-2	16	13	30	46	62	57	73	76	88
Teiln. E	-2	-4	9	1	19	32	45	32	44	37
Teiln. F	-2	-4	-7	11	18	15	2	0	17	34
Mittel	-2,00	1,80	8,00	14,60	23,80	30,00	30,80	31,40	47,20	49,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	64	62	80

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	98	96	114	132	130	148	166	204	222	240
Teiln. B	89	101	98	116	153	146	142	175	173	170
Teiln. C	33	45	40	37	55	67	62	45	41	38
Teiln. D	75	71	88	72	74	87	99	106	94	91
Teiln. E	28	21	19	17	-2	-4	-6	26	24	22
Teiln. F	32	50	36	34	72	69	62	74	92	85
Mittel	51,40	57,60	56,20	55,20	70,40	73,00	71,80	85,20	84,80	81,20
Mittel (Freif.)	98	96	114	132	130	148	166	204	222	240

Runde	21	22	23	24	25	26	27
Teiln. A (Freif.)	238	256	254	252	290	288	286
Teiln. B	178	196	193	189	226	223	235
Teiln. C	48	36	83	72	69	66	72
Teiln. D	102	120	146	139	130	146	162
Teiln. E	40	59	51	69	62	54	67
Teiln. F	83	98	96	114	102	100	98
Mittel	90,20	101,80	113,80	116,60	117,80	117,80	126,80
Mittel (Freif.)	238	256	254	252	290	288	286

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	-6	-8	10	8	26	44	42	60
Teiln. B	-2	-9	-16	-18	-25	-27	-29	-31	-33	-40
Teiln. C	-2	16	34	32	30	48	66	64	62	80
Teiln. D	-2	-5	-8	-11	-14	-20	-22	-24	-26	-27
Teiln. E	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-19	-21	-21	-21
Teiln. F	-2	-4	-6	-6	-9	-14	-21	-29	-32	-39
Mittel	-2,00	-1,20	-0,40	-2,20	-5,60	-5,00	-5,00	-8,20	-10,00	-9,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	10	8	26	44	42	60

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	58	56	54	52	70	68	66	64	82	120
Teiln. B	-42	-44	-56	-38	-40	-20	-22	-24	-36	-43
Teiln. C	78	72	70	68	86	104	102	100	137	135
Teiln. D	-29	-31	-13	-20	-28	-40	-42	-25	-28	-40
Teiln. E	-21	-21	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-10	-10
Teiln. F	-41	-43	-45	-47	-54	-56	-58	-66	-68	-35
Mittel	-11,00	-13,40	-9,00	-8,00	-7,80	-3,00	-4,60	-3,60	-1,00	1,40
Mittel (Freif.)	58	56	54	52	70	68	66	64	82	120

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A (Freif.)	118	116	134	132	130	128	126	144	142	160
Teiln. B	-45	-47	-49	-51	-33	-35	-17	-19	-21	-30
Teiln. C	133	131	129	129	147	145	145	145	145	143
Teiln. D	-40	-42	-42	-45	-57	-57	-57	-65	-65	-67
Teiln. E	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
Teiln. F	-38	-40	-47	-49	-51	-53	-62	-64	-66	-66
Mittel	0,00	-1,60	-3,80	-5,20	-0,80	-2,00	-0,20	-2,60	-3,40	-6,00
Mittel (Freif.)	118	116	134	132	130	128	126	144	142	160

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 11

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-6	7	7	25	18	16	14	14
Teiln. B	-2	15	32	49	46	63	61	54	52	49
Teiln. C	-2	-10	-18	-25	-27	-39	-46	-34	-46	-54
Teiln. D	-2	-4	-8	9	6	4	1	-2	16	9
Teiln. E	-2	-4	-7	-14	-14	-16	-18	-20	-20	-22
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	44	62	100
Mittel	-2,00	-1,40	-1,40	5,20	3,60	7,40	3,20	2,80	3,20	-0,80
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	44	62	100

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	32	49	47	79	77	70	68	63	81	79
Teiln. B	42	39	37	47	45	82	80	113	125	123
Teiln. C	-57	-60	-62	-50	-52	-59	-66	-53	-65	-67
Teiln. D	27	24	20	18	3	-5	13	15	8	5
Teiln. E	-29	-36	-38	-41	-28	-35	-37	-39	-19	-22
Teiln. F (Freif.)	98	96	94	92	130	168	166	204	222	220
Mittel	3,00	3,20	0,80	10,60	9,00	10,60	11,60	19,80	26,00	23,60
Mittel (Freif.)	98	96	94	92	130	168	166	204	222	220

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	72	70	70	68	81	99	92	85	83	96
Teiln. B	116	114	132	128	145	152	149	182	195	188
Teiln. C	-49	-51	-63	-50	-57	-44	-51	-58	-65	-67
Teiln. D	3	1	19	9	-3	-5	13	30	38	46
Teiln. E	-24	-24	-26	-26	-9	-11	-11	-11	6	4
Teiln. F (Freif.)	238	236	234	252	270	268	286	284	302	340
Mittel	23,60	22,00	26,40	25,80	31,40	38,20	38,40	45,60	51,40	53,40
Mittel (Freif.)	238	236	234	252	270	268	286	284	302	340

### Untersuchung Vertrauen – Gruppe 12

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	26	44	62	80
Teiln. B	-2	-9	-16	-3	-10	7	4	-3	-6	-13
Teiln. C	-2	-7	12	-3	-5	-7	5	-2	-2	-4
Teiln. D	-2	-4	12	50	47	59	57	70	68	106
Teiln. E	-2	16	9	27	24	32	50	70	63	56
Teiln. F	-2	-4	-7	6	24	22	10	23	21	14
Mittel	-2,00	-1,60	2,00	15,40	16,00	22,60	25,20	31,60	28,80	31,80
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	26	44	62	80

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	78	76	94	92	90	108	126	124	122	140
Teiln. B	-16	-3	-10	-17	-20	-23	-30	-33	-36	-23
Teiln. C	-4	-11	-12	-20	-22	-4	-11	-5	-7	9
Teiln. D	103	100	98	111	138	120	151	167	158	150
Teiln. E	56	54	52	65	78	90	82	95	114	112
Teiln. F	11	28	25	63	76	94	112	125	123	116
Mittel	30,00	33,60	30,60	40,40	50,00	55,40	60,80	69,80	70,40	72,80
Mittel (Freif.)	78	76	94	92	90	108	126	124	122	140

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A (Freif.)	138	156	154	172	170	208	206	224	242	260
Teiln. B	-26	-9	-16	-23	-6	7	0	-7	-14	-21
Teiln. C	1	-11	-11	-13	-25	-25	-7	30	29	49
Teiln. D	147	164	181	174	206	203	201	198	195	215
Teiln. E	129	142	134	147	145	135	133	120	113	106
Teiln. F	114	107	125	141	141	154	152	165	183	176
Mittel	73,00	78,60	82,60	85,20	92,20	94,80	95,80	101,20	101,20	105,00
Mittel (Freif.)	138	156	154	172	170	208	206	224	242	260

### Untersuchung Feedback – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	8	26	24	22	20
Teiln. B	-2	11	9	-3	-5	13	6	-1	17	10
Teiln. C	-2	11	8	1	-1	-9	29	22	15	33
Teiln. D	-2	16	13	51	47	39	36	56	69	69
Teiln. E	-2	-9	-11	-13	-15	5	0	20	13	13
Teiln. F	-2	-4	-6	10	7	0	-7	6	24	22
Mittel	-2,00	5,00	2,60	9,20	6,60	9,60	12,80	20,60	27,60	29,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	8	26	24	22	20

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (Freif.)	18	18	16	14	32	30	28	26	24	22
Teiln. B	28	26	19	17	10	28	41	54	62	55
Teiln. C	31	48	46	64	62	60	72	65	73	70
Teiln. D	67	65	63	55	93	86	104	121	119	137
Teiln. E	11	11	10	10	-2	18	11	11	31	30
Teiln. F	15	8	25	22	20	13	11	24	42	55
Mittel	30,40	31,60	32,60	33,60	36,60	41,00	47,80	55,00	65,40	69,40
Mittel (Freif.)	18	18	16	14	32	30	28	26	24	22

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A (Freif.)	20	38	36	34	32	30	28	26	24	22
Teiln. B	72	65	83	76	74	92	85	83	121	139
Teiln. C	82	100	88	81	101	94	112	105	93	85
Teiln. D	135	153	171	189	182	180	178	176	174	192
Teiln. E	30	23	23	21	21	21	21	21	20	20
Teiln. F	48	41	39	56	54	67	65	82	80	73
Mittel	73,40	76,40	80,80	84,60	86,40	90,80	92,20	93,40	97,60	101,80
Mittel (Freif.)	20	38	36	34	32	30	28	26	24	22

Runde	31
Teiln. A (Freif.)	40
Teiln. B	132
Teiln. C	103
Teiln. D	185
Teiln. E	20
Teiln. F	71
Mittel	102,20
Mittel (Freif.)	40

### Untersuchung Feedback – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	13	6	3	20	17	15	13	11
Teiln. B	-2	-9	-16	-18	-20	-22	-4	-12	-29	-37
Teiln. C	-2	-5	-12	-12	-14	-14	-21	-21	-21	-23
Teiln. D	-2	-4	-6	-8	-10	-16	1	-8	10	28
Teiln. E (Freif.)	-2	-4	14	12	10	8	6	24	42	40
Teiln. F	-2	16	14	30	27	19	11	43	60	58
Mittel	-2,00	-1,20	-1,40	-0,40	-2,80	-2,60	0,80	3,40	6,60	7,40
Mittel (Freif.)	-2	-4	14	12	10	8	6	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	24	16	34	51	68	65	83	80	71	89
Teiln. B	-39	17	29	26	18	11	31	24	16	48
Teiln. C	-25	-30	-37	-37	-39	-44	-46	-48	-48	-48
Teiln. D	21	18	1	-2	-10	8	1	-1	-3	-5
Teiln. E (Freif.)	38	36	54	52	50	48	46	44	42	60
Teiln. F	68	61	97	88	106	122	113	131	169	151
Mittel	9,80	16,40	24,80	25,20	28,60	32,40	36,40	37,20	41,00	47,00
Mittel (Freif.)	38	36	54	52	50	48	46	44	42	60

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	126	124	121	138	146	139	132	150	143	155
Teiln. B	46	37	34	22	38	35	55	68	64	77
Teiln. C	-55	-55	-57	-59	-59	-61	-63	-43	-43	-48
Teiln. D	-7	-9	-22	-4	-16	-18	-20	-27	-27	-29
Teiln. E (Freif.)	58	56	74	92	110	108	106	104	122	120
Teiln. F	143	161	176	181	198	214	210	202	199	215
Mittel	50,60	51,60	50,40	55,60	61,40	61,80	62,80	70,00	67,20	74,00
Mittel (Freif.)	58	56	74	92	110	108	106	104	122	120

### Untersuchung Feedback – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	-12	-20	-27	-34	-36	-38	-26	-29
Teiln. B	-2	-5	8	5	22	40	37	34	34	31
Teiln. C	0	-2	13	8	8	8	8	7	7	7
Teiln. D	-2	-5	-8	-10	-12	-12	-14	-16	-23	-25
Teiln. E	-2	16	14	14	12	12	12	10	10	8
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	32	30	28	26	24	42	40
Mittel	-1,60	-1,00	3,00	-0,60	0,60	2,80	1,40	-0,60	0,40	-1,60
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	32	30	28	26	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-32	-35	-37	-40	-43	-46	-48	-55	-58	-60
Teiln. B	23	15	7	7	5	-2	-6	-9	-9	-12
Teiln. C	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6
Teiln. D	-28	-30	-17	-19	-21	-23	-29	-32	-35	-37
Teiln. E	8	26	24	24	24	22	42	40	40	40
Teiln. F (Freif.)	58	56	74	72	70	88	86	104	102	100
Mittel	-4,40	-3,40	-3,20	-4,40	-5,80	-8,60	-7,00	-10,00	-11,20	-12,60
Mittel (Freif.)	58	56	74	72	70	88	86	104	102	100

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	-62	-69	-71	-74	-76	-78	-80	-82	-84	-86
Teiln. B	-20	-20	-24	-24	-33	-37	-42	-42	-43	-46
Teiln. C	6	6	6	1	1	1	1	1	1	1
Teiln. D	-19	-21	-23	-6	-8	-15	3	1	-1	-3
Teiln. E	38	58	56	56	74	72	72	70	70	70
Teiln. F (Freif.)	98	96	94	92	90	108	106	104	102	100
Mittel	-11,40	-9,20	-11,20	-9,40	-8,40	-11,40	-9,20	-10,40	-11,40	-12,80
Mittel (Freif.)	98	96	94	92	90	108	106	104	102	100

### Untersuchung Feedback – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	7	0	17	15	12	10	8	28
Teiln. B	-2	15	8	5	3	0	-2	16	12	9
Teiln. C	-2	-5	13	11	4	2	-1	-4	14	2
Teiln. D	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-1	7	5
Teiln. E	-2	-10	-12	-15	-3	-5	-7	-14	-6	-9
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	12	10	8	6	4	24	42
Mittel	-2,00	1,40	2,00	-1,40	2,20	0,00	-2,40	1,40	7,00	7,00
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	12	10	8	6	4	24	42

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	47	66	66	61	59	58	57	55	48	46
Teiln. B	2	-5	-7	31	23	21	14	12	20	8
Teiln. C	0	18	29	26	23	35	33	28	25	42
Teiln. D	3	-4	-6	-18	-20	-22	-4	-6	12	9
Teiln. E	-13	-15	-2	-4	14	25	18	16	13	11
Teiln. F (Freif.)	40	38	36	54	52	50	68	66	84	102
Mittel	7,80	12,00	16,00	19,20	19,80	23,40	23,60	21,00	23,60	23,20
Mittel (Freif.)	40	38	36	54	52	50	68	66	84	102

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	46	45	43	43	36	36	56	56	56	56
Teiln. B	1	-1	-9	9	22	20	58	51	49	67
Teiln. C	40	37	50	41	38	76	74	92	90	83
Teiln. D	46	44	41	34	31	27	20	18	16	14
Teiln. E	4	-3	-10	8	26	13	1	-1	-4	-6
Teiln. F (Freif.)	100	118	156	154	152	150	148	146	144	142
Mittel	27,40	24,40	23,00	27,00	30,60	34,40	41,80	43,20	41,40	42,80
Mittel (Freif.)	100	118	156	154	152	150	148	146	144	142

### Untersuchung Feedback – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	0	-9	-11	-13	-15	3	1	-1	17	15
Teiln. B	-2	-2	-15	-20	-23	-30	-33	-35	-42	-4
Teiln. C	-2	-4	28	16	33	20	17	33	53	43
Teiln. D	-2	-5	13	30	28	66	58	50	88	85
Teiln. E	-2	-4	9	27	19	17	35	30	10	3
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	32	30	28	26	44	42	40
Mittel	-1,60	-4,80	4,80	8,00	8,40	15,20	15,60	15,40	25,20	28,40
Mittel (Freif.)	-2	16	14	32	30	28	26	44	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	32	30	28	46	44	82	100	98	110	127
Teiln. B	-17	-24	-24	-13	-15	-3	-3	-7	31	24
Teiln. C	40	58	51	89	100	93	91	109	115	128
Teiln. D	82	74	72	53	59	57	50	62	54	52
Teiln. E	1	-1	15	8	20	18	11	3	-4	-6
Teiln. F (Freif.)	58	76	74	92	110	148	166	164	182	180
Mittel	27,60	27,40	28,40	36,60	41,60	49,40	49,80	53,00	61,20	65,00
Mittel (Freif.)	58	76	74	92	110	148	166	164	182	180

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	125	121	139	130	128	146	144	162	160	158
Teiln. B	22	20	32	52	44	37	35	35	35	35
Teiln. C	145	142	150	138	126	144	142	160	153	151
Teiln. D	44	42	54	72	85	123	120	111	129	147
Teiln. E	-8	-13	-20	-2	12	-5	-7	-14	-16	-23
Teiln. F (Freif.)	178	176	194	192	230	228	226	224	222	220
Mittel	65,60	62,40	71,00	78,00	79,00	89,00	86,80	90,80	92,20	93,60
Mittel (Freif.)	178	176	194	192	230	228	226	224	222	220

### Untersuchung Feedback – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	14	7	5	2	0	-2	-5	-7
Teiln. B	-2	-11	-13	5	3	1	19	32	25	25
Teiln. C	-2	-5	-12	-20	-22	-29	-16	-18	-25	-25
Teiln. D	-2	16	14	10	2	-2	-4	4	17	15
Teiln. E	-2	-9	-12	5	22	40	33	31	49	46
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	6	24	42	40
Mittel	-2,00	-2,60	-1,80	1,40	2,00	2,40	6,40	9,40	12,20	10,80
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	10	8	6	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	9	27	20	18	16	14	12	9	7	0
Teiln. B	12	5	23	21	19	17	15	13	11	9
Teiln. C	-28	-30	-33	-15	3	-4	9	7	-1	-2
Teiln. D	13	5	22	9	-14	-17	21	14	10	8
Teiln. E	44	61	54	52	89	106	89	86	106	104
Teiln. F (Freif.)	58	56	54	72	90	88	106	124	122	140
Mittel	10,00	13,60	17,20	17,00	22,60	23,20	29,20	25,80	26,60	23,80
Mittel (Freif.)	58	56	54	72	90	88	106	124	122	140



Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	-7	-9	-9	-11	-13	-15	-17	-19	-21	-23
Teiln. B	27	45	83	81	98	93	84	82	75	93
Teiln. C	-5	13	6	2	-1	19	19	12	32	25
Teiln. D	28	16	4	2	-5	-7	11	8	6	-1
Teiln. E	90	88	86	84	82	80	78	96	94	92
Teiln. F (Freif.)	158	156	174	172	170	168	166	164	162	180
Mittel	26,60	30,60	34,00	31,60	32,20	34,00	35,00	35,80	37,20	37,20
Mittel (Freif.)	158	156	174	172	170	168	166	164	162	180

### Untersuchung Feedback – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	-12	-12	-16	-21	-21	-23	-25	-27
Teiln. B	-2	11	10	7	6	3	1	-4	-11	-17
Teiln. C	-2	11	4	2	0	-2	-4	14	12	10
Teiln. D	-2	16	34	32	28	26	24	22	20	18
Teiln. E	-2	-9	-11	-13	-16	-19	-21	-28	-30	-32
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	12	10	28	26	44	62	80
Mittel	-2,00	4,00	5,00	3,20	0,40	-2,60	-4,20	-3,80	-6,80	-9,60
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	10	28	26	44	62	80

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-29	-31	-31	-38	-40	-47	-47	-49	-51	-53
Teiln. B	-19	-26	-29	-11	-11	-13	-21	-29	-31	-40
Teiln. C	8	6	4	2	20	18	36	32	30	28
Teiln. D	16	14	52	50	63	61	54	52	50	48
Teiln. E	-32	-35	-48	-50	-57	-57	-57	-59	-61	-63
Teiln. F (Freif.)	78	96	94	92	90	108	126	144	142	160
Mittel	-11,20	-14,40	-10,40	-9,40	-5,00	-7,60	-7,00	-10,60	-12,60	-16,00
Mittel (Freif.)	78	96	94	92	90	108	126	144	142	160

Runde	21	22	23	24	25	26	27
Teiln. A	-55	-57	-64	-66	-68	-68	-70
Teiln. B	-42	-50	-30	-38	-40	-42	-44
Teiln. C	26	24	42	40	38	36	34
Teiln. D	46	64	62	80	78	76	94
Teiln. E	-65	-65	-72	-72	-72	-72	-79
Teiln. F (Freif.)	158	156	154	152	150	148	146
Mittel	-18,00	-16,80	-12,40	-11,20	-12,80	-14,00	-13,00
Mittel (Freif.)	158	156	154	152	150	148	146

### Untersuchung Feedback – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-9	-11	-13	-16	-16	-20	-20	-5
Teiln. B	-2	-7	6	3	0	-2	-9	-11	-18	-5
Teiln. C	-2	16	34	32	30	28	26	24	22	20
Teiln. D	-2	-4	-8	-11	-11	-14	-14	-21	-22	-24
Teiln. E	-2	-6	-9	-11	-13	-15	-27	-7	-11	-11
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	24	42	40
Mittel	-2,00	-1,00	2,80	0,40	-1,40	-3,80	-8,00	-7,00	-9,80	-5,00
Mittel (Freif.)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	26	24	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-7	-13	-15	-15	-17	-19	-26	-26	-33	-33
Teiln. B	-7	10	8	5	2	0	18	14	12	10
Teiln. C	18	18	18	16	16	16	16	16	16	16
Teiln. D	-25	-28	-28	-30	-36	-38	-43	-44	-51	-51
Teiln. E	-11	-11	-20	-22	-9	-11	7	5	3	1
Teiln. F (Freif.)	38	36	54	52	70	68	66	64	102	100
Mittel	-6,40	-4,80	-7,40	-9,20	-8,80	-10,40	-5,60	-7,00	-10,60	-11,40
Mittel (Freif.)	38	36	54	52	70	68	66	64	102	100

Runde	21	22	23	24	25	26	27
Teiln. A	-33	-33	-33	-33	-34	-34	-34
Teiln. B	7	5	3	1	-1	-8	-8
Teiln. C	14	14	14	14	14	14	14
Teiln. D	-53	-53	-55	-55	-57	-59	-61
Teiln. E	-1	-3	-5	-8	-10	-19	-19
Teiln. F (Freif.)	98	96	94	92	90	128	126
Mittel	-13,20	-14,00	-15,20	-16,20	-17,60	-21,20	-21,60
Mittel (Freif.)	98	96	94	92	90	128	126

### Untersuchung Feedback – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	3	0	-8	28	24	21	19	17
Teiln. B	-2	16	32	28	24	42	59	57	80	78
Teiln. C	-2	-9	-14	-16	-18	-25	-1	-7	-19	-22
Teiln. D	-2	-5	12	9	6	-1	12	32	59	51
Teiln. E	-2	-11	-13	-16	-18	-31	-38	-45	-9	-16
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	12	30	48	66	84	102	140
Mittel	-2,00	0,40	4,00	1,00	-2,80	2,60	11,20	11,60	26,00	21,60
Mittel (Freif.)	-2	16	14	12	30	48	66	84	102	140

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	14	27	24	37	30	43	36	32	30	27
Teiln. B	71	82	79	131	129	147	159	157	150	168
Teiln. C	-22	-25	-36	-36	-38	-41	-41	-41	-46	-51
Teiln. D	65	62	79	88	76	69	85	80	77	74
Teiln. E	-19	-11	-14	-11	2	15	12	5	2	14
Teiln. F (Freif.)	138	156	174	192	250	248	246	284	322	320
Mittel	21,80	27,00	26,40	41,80	39,80	46,60	50,20	46,60	42,60	46,40
Mittel (Freif.)	138	156	174	192	250	248	246	284	322	320

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Teiln. A	19	29	36	34	33	21	34	31	43
Teiln. B	184	181	173	171	189	177	214	207	224
Teiln. C	-62	-64	-64	-66	-66	-66	-71	-73	-74
Teiln. D	112	123	121	137	134	132	129	124	137
Teiln. E	10	8	26	14	2	40	33	50	52
Teiln. F (Freif.)	318	336	354	372	390	428	426	424	442
Mittel	52,60	55,40	58,40	58,00	58,40	60,80	67,80	67,80	76,40
Mittel (Freif.)	318	336	354	372	390	428	426	424	442

### Untersuchung Feedback – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-6	-14	-16	-28	-31	-33	-35	-37
Teiln. B	-2	-4	-1	-3	-7	-10	-12	-15	-20	-22
Teiln. C	-2	-9	4	-3	-16	-4	14	22	19	32
Teiln. D	-2	18	17	16	13	10	2	0	13	31
Teiln. E	-2	-4	-6	32	70	90	88	96	94	84
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	34	32	30	48	46	84	102	120
Mittel	-2,00	-0,60	1,60	5,60	8,80	11,60	12,20	14,00	14,20	17,60
Mittel (Freif.)	-2	-4	34	32	30	48	46	84	102	120

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-20	-7	-9	9	7	5	22	22	19	17
Teiln. B	-22	-2	-4	9	2	19	17	25	18	16
Teiln. C	30	28	26	44	41	58	55	63	61	59
Teiln. D	22	20	18	46	34	26	24	52	50	47
Teiln. E	77	87	84	72	90	83	78	77	75	70
Teiln. F (Freif.)	138	136	134	132	170	168	166	204	222	240
Mittel	17,40	25,20	23,00	36,00	34,80	38,20	39,20	47,80	44,60	41,80
Mittel (Freif.)	138	136	134	132	170	168	166	204	222	240

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	15	13	11	9	6	24	23	16	14	10
Teiln. B	11	11	4	22	20	13	13	13	6	4
Teiln. C	57	55	53	66	59	52	50	50	48	48
Teiln. D	43	36	54	72	90	108	126	124	162	160
Teiln. E	68	67	63	51	51	64	57	55	50	49
Teiln. F (Freif.)	258	276	274	272	270	268	266	284	282	280
Mittel	38,80	36,40	37,00	44,00	45,20	52,20	53,80	51,60	56,00	54,20
Mittel (Freif.)	258	276	274	272	270	268	266	284	282	280

### Untersuchung Feedback – Gruppe 11

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	11	11	-1	-3	-3	-6	12	10	7
Teiln. B	-2	-4	8	21	21	19	36	29	26	24
Teiln. C	-2	-4	9	2	0	-3	-11	-14	-1	-5
Teiln. D	-2	-4	14	31	28	26	24	22	35	32
Teiln. E	-2	-9	-17	-17	-17	-20	-24	-24	-27	-27
Teiln. F (Freif.)	-2	16	14	52	50	48	46	44	42	40
Mittel	-2,00	-2,00	5,00	7,20	5,80	3,80	3,80	5,00	8,60	6,20
Mittel (Freif.)	-2	16	14	52	50	48	46	44	42	40

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	0	20	33	53	46	44	42	60	58	56
Teiln. B	42	53	64	57	77	77	75	68	61	58
Teiln. C	-8	-15	3	-4	14	12	10	-2	-4	-12
Teiln. D	29	21	17	35	22	9	7	45	62	59
Teiln. E	-27	-27	-35	-40	-22	-9	-11	-18	-21	-23
Teiln. F (Freif.)	38	56	54	72	70	108	106	124	122	140
Mittel	7,20	10,40	16,40	20,20	27,40	26,60	24,60	30,60	31,20	27,60
Mittel (Freif.)	38	56	54	72	70	108	106	124	122	140

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	74	87	85	80	73	73	71	69	62	62
Teiln. B	46	83	79	97	95	111	108	126	122	120
Teiln. C	-21	-9	-11	-19	-21	-8	-11	1	-1	-4
Teiln. D	56	48	40	52	49	46	43	36	34	32
Teiln. E	-25	-17	-17	-19	-21	-28	-28	-30	-30	-33
Teiln. F (Freif.)	178	176	194	212	230	228	226	224	242	240
Mittel	26,00	38,40	35,20	38,20	35,00	38,80	36,60	40,40	37,40	35,40
Mittel (Freif.)	178	176	194	212	230	228	226	224	242	240

### Untersuchung Feedback – Gruppe 12

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	0	-2	7	5	-3	-5	-10	-13	-16	-20
Teiln. B	-2	-4	-11	2	15	12	5	22	15	7
Teiln. C	-4	-4	-4	-2	16	4	42	30	42	39
Teiln. D	0	-2	-6	11	8	46	43	36	34	49
Teiln. E	-2	-4	-6	-8	-11	-18	-25	13	31	24
Teiln. F (Freif.)	-2	-4	34	52	50	68	86	84	82	120
Mittel	-1,60	-3,20	-4,00	1,60	5,00	7,80	11,00	17,60	21,20	19,80
Mittel (Freif.)	-2	-4	34	52	50	68	86	84	82	120

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-23	-23	-30	-37	-39	-41	-47	-50	-55	-57
Teiln. B	0	-3	-10	3	-4	-11	-18	-21	-4	-7
Teiln. C	36	54	71	67	64	60	78	90	81	66
Teiln. D	47	60	59	52	49	42	42	40	48	66
Teiln. E	22	17	33	31	29	67	65	58	75	92
Teiln. F (Freif.)	138	134	134	172	190	188	206	224	242	240
Mittel	16,40	21,00	24,60	23,20	19,80	23,40	24,00	23,40	29,00	32,00
Mittel (Freif.)	138	134	134	172	190	188	206	224	242	240

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	-64	-64	-65	-67	-50	-50	-51	-53	-33	-46
Teiln. B	-12	-19	-26	-27	-34	-41	-44	-31	-34	-37
Teiln. C	84	82	73	63	100	107	105	103	91	87
Teiln. D	84	77	110	127	120	133	125	142	158	151
Teiln. E	89	107	100	118	111	149	147	140	133	171
Teiln. F (Freif.)	240	256	294	292	290	288	306	304	322	340
Mittel	36,20	36,60	38,40	42,80	49,40	59,60	56,40	60,20	63,00	65,20
Mittel (Freif.)	240	256	294	292	290	288	306	304	322	340

## Ergebnis des Strategiespiels bezüglich Feedback

Im Strategiespiel bezüglich Feedback wurden den Teilnehmern unterschiedliche Kombinationen positiven und negativen Feedbacks gezeigt. Sie wurden gebeten anzugeben, ob sie mit einem Teilnehmer kooperieren würden, über den sie keine anderen Informationen als die gegebene Feedbackkombination besitzen.

Im Folgenden zeigt die Spalte „Feedback“ die vorgelegten Feedbackkombinationen. Die Spalte „Strategy X“ zeigt eine bestimmte Strategie. Ist hier die Spalte „ja“ markiert, hat der Teilnehmer bei der entsprechenden Feedbackkombination für den anderen Mitspieler bearbeitet, sonst nicht. Die Zahlen unterhalb der Strategien zeigen, wie viele Teilnehmer die entsprechende Strategie nutzten.

Feedback		Strategie 1		Strategie 2		Strategie 3		Strategie 4		Strategie 5		Strategie 6	
+	-	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
5	0	x		x		x		x		x		x	
0	5	x			x		x		x		x		x
2	1	x		x		x		x		x		x	
1	2	x		x		x		x		x		x	
3	2	x		x		x		x		x		x	
2	3	x		x		x		x		x		x	
1	0	x		x		x		x		x		x	
0	1	x		x		x		x		x		x	
Auftreten:		3		7		4		2		3		3	

Feedback		Strategie 7		Strategie 8		Strategie 9		Strategie 10		Strategie 11		Strategie 12	
+	-	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
5	0	x		x		x		x		x		x	
0	5		x		x		x		x		x		x
2	1	x		x		x		x		x		x	
1	2		x	x		x			x		x		x
3	2	x		x		x		x		x		x	
2	3	x			x		x		x		x		x
1	0	x		x		x		x		x		x	
0	1		x		x		x		x		x		x
Auftreten:		3		3		1		3		18		1	

Feedback		Strategie 13		Strategie 14		Strategie 15		Strategie 16		Strategie 17		Strategie 18	
+	-	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
5	0	x		x		x		x		x		x	
0	5		x		x		x		x		x		x
2	1	x			x	x			x	x			x
1	2		x		x		x		x		x		x
3	2		x	x		x			x		x		x
2	3		x		x		x		x		x		x
1	0	x		x		x		x		x		x	
0	1		x		x		x		x		x		x
Auftreten:		2		2		3		7		1		2	

Feedback		Strategie 19		Strategie 20	
+	-	ja	nein	ja	nein
5	0		x		
0	5		x		
2	1		x		
1	2		x		
3	2		x		
2	3		x		
1	0		x		
0	1		x		
Auftreten:		2		2	

Fragebogen  
nicht be-  
antwortet

Die dargestellten Strategien lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- 1.) Strategien ohne Einfluss von Feedback (5 Teilnehmer):  
Hierzu zählen Strategie 1 und Strategie 19
- 2.) Zufällige, aber feedbackabhängige Strategien (2 Teilnehmer)  
Hierzu zählen Strategie 9 und Strategie 12
- 3.) Keine Antwort (2 Teilnehmer)  
Hierzu zählt nur Strategie 20
- 4.) Strategien abhängig von Feedback (63 Teilnehmer)  
Alle übrigen Strategien zählen zu dieser Gruppe

### Ergebnis des Strategiespiels bezüglich der gespielten Strategien

Während des Strategiespiels wurden die Teilnehmer gebeten zu beschreiben, wie sie den Empfänger ihrer Anfragen wählen und für wen sie Anfragen bearbeiten. Die Teilnehmer beantworteten diese Frage für beide Untersuchungen gleich. Bei ihrer Beschreibung sollten sich die Teilnehmer auf die folgenden drei Aspekte konzentrieren.

- Wem sendeten Sie Anfragen?
- Für wen beantworteten Sie Anfragen?
- Für wen leiteten Sie Anfragen weiter?

Bei der Analyse wurden die Teilnehmer nicht berücksichtigt, die angewiesen wurden sich unkooperativ zu verhalten. Diese Spieler waren:

- Gruppe 1 und Gruppen 3 bis 12: Teilnehmer A
- Gruppe 2: Teilnehmer F

*Startphase:* Teilnehmer spielten eine Startphase, wenn sie in den ersten Runden alle Anfragen beantworteten.

*Endphase:* Teilnehmer spielten eine Endphase, wenn sie am Ende des Spiels keine Anfragen mehr bearbeiteten.

**Beobachtete Strategien:** Die beobachteten Strategien sind im Folgenden aufgelistet.

**Stellen von Anfragen:** Bezüglich des Stel-  
lens von Anfragen, konnten die folgenden  
vier Basisstrategien beobachtet werden:

- 1.) Senden von Anfragen an den Teil-  
nehmer, der dem Anfragepunkt am  
nächsten ist (nächster Teilnehmer)

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	C, E, F	3
2	A, B	2
4	B, E	2
5	B, F	2
6	D	1
7	D	1
10	C	1
12	B	1
<b>Summe</b>		<b>13</b>

- 2.) Senden von Anfragen an kooperative  
Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
3	D, E	2
4	C	1
5	E	1
6	B, E, F	3
7	B, E	2
8	B, C, D, F	4
9	D, F	2
10	B, D, E, F	4
11	C, D, E	3
12	C	1
<b>Summe</b>		<b>24</b>

- 3.) Senden von Anfragen an Teilnehmer  
mit positivem Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	D	1
3	F	1
4	D	1
9	C, E	2
12	F	1
<b>Summe</b>		<b>6</b>

Daneben nutzten einige Teilnehmer Kom-  
binationen aus diesen Basisstrategien:

- 1.) Nächster Teilnehmer und Kooperation

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	C	1
6	C	1
7	C	1
11	B	1
<b>Summe</b>		<b>4</b>

- 2.) Nächster Teilnehmer und Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
12	E	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

- 3.) Kooperation und Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	E	1
5	C, D	2
7	F	1
8	E	1
11	F	1
12	D	1
<b>Summe</b>		<b>7</b>

Die folgenden Teilnehmer spielten zufalls-  
abhängige Strategien:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	D	1
3	B	1
4	F	1
<b>Summe</b>		<b>3</b>

Die folgenden Teilnehmer beantworteten  
den Fragebogen nicht:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
3	C	1
9	B	1
<b>Summe</b>		<b>2</b>

**Beantworten von Anfragen:** Die Strategien  
bezüglich des Beantwortens von Anfragen  
werden im Folgenden in vier Klassen unter-  
teilt: Strategien abhängig von Kooperati-  
vität, Strategien abhängig von Feedback,  
Strategien abhängig von Feedback und  
Kooperativität und sonstige Strategien.

Strategien abhängig von Kooperativität:

- 1.) Reine Strategie

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
2	E	1
3	C, D	2
4	B	1
5	C, D, E	3
6	B, E, F	3
7	B, C, D, E	4
8	D, E, F	3
9	D	1
10	D, E, F	3
11	D	1
12	B, D	2
<b>Summe</b>		<b>25</b>

- 2.) Plus Startphase

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	F	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

- 3.) Nur wenn lange keine Antwort

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
6	C	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

Strategien abhängig von Feedback:

- 1.) Für Teilnehmer mit positivem Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	D	1
3	E, F	2
9	C, E, F	3
10	B	1
11	E	1
12	E, F	2
Summe		10

- 2.) Für Teilnehmer ohne negatives Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
7	F	1
12	C	1
Summe		2

- 3.) Für Teilnehmer mit positivem Feedback, wenn eigene Auszahlung gering

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	B	1
Summe		1

- 4.) Für Teilnehmer mit positivem Feedback, die nur wenige Anfragen verschickten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	E	1
Summe		1

Strategien abhängig von Feedback und Kooperativität:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	C	1
4	D	1
5	F	1
8	C	1
11	B, C	2
Summe		6

Sonstige Strategien:

- 1.) Immer antworten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	C	1
2	A	1
3	B	1
4	E, F	2
5	B	1
8	B	1
Summe		7

- 2.) Immer antworten plus Endphase

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
6	D	1
10	C	1
Summe		2

- 3.) Zufallsabhängige Strategie

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	D	1
Summe		1

- 4.) Selten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
11	F	1
Summe		1

- 5.) Antworten, wenn Punktestand positiv

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
4	C	1
Summe		1

Fragen nicht beantwortet:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
9	B	1
Summe		1

Weiterleiten von Anfragen: Die Strategien bezüglich des Weiterleitens von Anfragen werden im Folgenden in vier Klassen unterteilt: Strategien abhängig von Kooperativität, Strategien abhängig von Feedback, Strategien abhängig von Feedback und Kooperativität und sonstige Strategien.

Strategien abhängig von Kooperativität:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	F	1
3	C, D	2
4	B, C	2
6	B, E	2
7	B, C, D, E	4
8	B, D, E, F	4
9	D	1
10	D, F	2
Summe		18

Strategien abhängig von Feedback:

- 1.) Für Teilnehmer mit positivem Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	B	1
6	F	1
9	C, F	2
12	E, F	2
Summe		6

- 2.) Für Teilnehmer ohne negatives Feedback

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
4	E	1
5	C, D	2
7	F	1
11	F	1
Summe		5

Strategien abhängig von Feedback und Kooperativität:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	C	1
3	E, F	2
4	D	1
8	C	1
10	E	1
11	B	1
Summe		7

Sonstige Strategien:

1.) Alles weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	C, E	2
2	A, E	2
3	B	1
4	F	1
5	B, E, F	3
9	E	1
11	D	1
12	B, C, D	3
Summe		14

2.) Immer weiterleiten plus Endphase

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
6	D	1
10	C	1
Summe		3

3.) Niemals weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
10	B	1
11	E	1
Summe		2

4.) Selten weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
2	D	1
Summe		1

5.) Weiterleiten abhängig von Zufall

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
6	C	1
Summe		1

6.) Punktestand abhängig

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	D	1
11	C	1
Summe		2

Fragen nicht beantwortet:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
9	B	1
Summe		1



## Anhang A.4 – Experimentreihe Heterogenität – Detailergebnisse

Die beschriebenen Detailergebnisse beziehen sich auf die Experimentreihe Heterogenität. Die Ergebnisse in Abschnitt 3.3.3 basieren auf diesen Daten.

### Entwicklung der Auszahlung

Die folgenden Tabellen enthalten die Auszahlungen der Teilnehmer in den gespielten Runden.

#### Untersuchung Standard – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	13	26	43	41	59	56	113	150
Teiln. B	-2	-6	32	29	66	79	72	109	105	123
Teiln. C	0	-7	13	6	25	24	22	15	33	49
Teiln. D	-2	-2	-6	29	20	17	16	36	50	49
Teiln. E	-2	18	11	28	25	63	75	92	104	121
Teiln. F	0	-2	-9	-11	24	18	11	8	7	24
Mittel	-1,33	2,83	9,00	17,83	33,83	40,33	42,50	52,67	68,67	86,00

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	142	155	148	146	185	181	194	192	224	221
Teiln. B	156	153	171	188	226	239	259	247	246	262
Teiln. C	68	67	60	79	78	71	90	87	101	95
Teiln. D	42	42	35	53	53	53	48	66	60	93
Teiln. E	138	150	148	181	178	195	232	229	247	285
Teiln. F	21	41	35	29	21	41	39	57	55	71
Mittel	94,50	101,33	99,50	112,67	123,50	130,00	143,67	146,33	155,50	171,17

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	214	213	211	229
Teiln. B	250	277	275	293
Teiln. C	88	107	107	105
Teiln. D	93	88	86	79
Teiln. E	283	280	293	286
Teiln. F	59	98	97	90
Mittel	164,50	177,17	178,17	180,33

#### Untersuchung Standard – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-6	-7	-8	-8	-9	-9	-9	-11
Teiln. B	-2	-9	-11	-14	-16	36	53	65	62	60
Teiln. C	0	-2	-4	5	3	18	15	13	33	31
Teiln. D	-2	-4	16	14	27	24	39	39	29	27
Teiln. E	0	-2	-5	35	33	29	47	64	62	75
Teiln. F	0	0	0	0	0	-5	-10	-12	-12	-13
Mittel	-1,00	-3,50	-1,67	5,50	6,50	15,67	22,50	26,67	27,50	28,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	2	0	-8	25	58	55	52	49	85	78
Teiln. B	57	65	81	97	115	113	101	114	149	167
Teiln. C	23	43	60	52	69	77	75	93	131	146
Teiln. D	45	41	69	85	81	79	97	95	131	147
Teiln. E	93	91	108	126	138	136	124	132	130	168
Teiln. F	3	1	-4	-6	12	12	7	0	-1	-1
Mittel	37,17	40,17	51,00	63,17	78,83	78,67	76,00	80,50	104,17	117,50

Runde	21	22	23
Teiln. A	75	66	63
Teiln. B	160	153	211
Teiln. C	159	176	189
Teiln. D	140	153	150
Teiln. E	166	164	161
Teiln. F	-3	12	-1
Mittel	116,17	120,67	128,83

### Untersuchung Standard – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-5	-7	31	23	14	32	30	46	65
Teiln. B	-2	16	29	26	23	16	16	8	7	23
Teiln. C	-2	15	13	6	3	41	38	56	74	67
Teiln. D	-2	15	13	10	68	65	78	95	93	106
Teiln. E	-2	18	17	17	12	12	10	10	28	28
Teiln. F	-2	14	7	5	3	23	20	22	29	46
Mittel	-2,00	12,17	12,00	15,83	22,00	28,50	32,33	36,83	46,17	55,83

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	61	59	57	90	87	105	101	113	103	143
Teiln. B	41	37	34	31	70	70	83	103	116	112
Teiln. C	65	103	140	157	154	146	164	162	154	172
Teiln. D	118	136	144	141	174	167	154	167	185	178
Teiln. E	26	26	25	24	24	19	17	16	16	13
Teiln. F	83	94	92	124	121	119	132	119	157	145
Mittel	65,67	75,83	82,00	94,50	105,00	104,33	108,50	113,33	121,83	127,17

Runde	21
Teiln. A	140
Teiln. B	110
Teiln. C	170
Teiln. D	186
Teiln. E	11
Teiln. F	143
Mittel	126,67

### Untersuchung Standard – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	13	33	32	30	30	68	84	77
Teiln. B	-2	-2	16	34	54	52	50	45	56	73
Teiln. C	-2	16	34	30	46	43	56	68	81	121
Teiln. D	0	-2	9	27	25	22	37	34	49	49
Teiln. E	-2	15	13	6	4	37	25	78	96	92
Teiln. F	-2	-6	32	29	47	66	64	61	53	81
Mittel	-1,67	6,17	19,50	26,50	34,67	41,67	43,67	59,00	69,83	82,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	95	112	109	107	145	163	160	178	214	232
Teiln. B	86	78	110	123	115	133	146	159	159	157
Teiln. C	136	153	171	164	161	179	186	184	196	214
Teiln. D	66	84	79	76	76	64	82	94	92	110
Teiln. E	128	126	146	144	127	122	140	135	168	164
Teiln. F	98	96	109	109	107	147	143	151	163	160
Mittel	101,50	108,17	120,67	120,50	121,83	134,67	142,83	150,17	165,33	172,83

Runde	21
Teiln. A	251
Teiln. B	148
Teiln. C	227
Teiln. D	127
Teiln. E	161
Teiln. F	198
Mittel	185,33

### Untersuchung Standard – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	0	0	-4	-6	9	8	6	25	20	18
Teiln. B	-2	16	29	46	44	61	58	96	114	127
Teiln. C	-2	-5	12	3	23	20	12	49	67	64
Teiln. D	-2	-4	-6	33	25	23	16	15	15	15
Teiln. E	-2	-2	-9	9	3	21	36	32	30	28
Teiln. F	-2	-9	9	7	5	23	43	41	41	39
Mittel	-1,67	-0,67	5,17	15,33	18,17	26,00	28,50	43,00	47,83	48,50

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	18	18	16	11	10	9	2	2	42	41
Teiln. B	140	138	155	153	140	158	176	188	206	224
Teiln. C	58	56	53	49	67	105	97	129	145	163
Teiln. D	33	31	50	38	36	32	30	30	27	27
Teiln. E	27	25	38	58	51	48	42	34	53	52
Teiln. F	37	35	33	51	71	89	109	107	104	102
Mittel	52,17	50,50	57,50	60,00	62,50	73,50	76,00	81,67	96,17	101,50

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	41	39	36	56
Teiln. B	222	240	246	284
Teiln. C	161	159	190	197
Teiln. D	47	44	64	56
Teiln. E	49	42	60	56
Teiln. F	100	98	96	96
Mittel	103,33	103,67	115,33	124,17

### Untersuchung Standard – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	15	12	9	6	-1	16	16	7	23
Teiln. B	-2	-5	13	31	44	37	34	31	68	100
Teiln. C	-2	15	8	46	43	55	92	109	126	123
Teiln. D	-2	11	4	16	34	21	54	72	89	120
Teiln. E	0	0	0	0	-7	6	3	-2	15	32
Teiln. F	-2	15	13	8	6	-1	-4	-4	28	41
Mittel	-1,67	8,50	8,33	18,33	21,00	19,50	32,50	37,00	55,50	73,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	39	32	23	21	37	29	26	55	46	44
Teiln. B	112	123	135	152	189	187	184	197	195	253
Teiln. C	141	134	171	206	204	202	215	227	240	257
Teiln. D	133	146	161	153	190	203	215	208	216	254
Teiln. E	29	49	69	69	82	77	67	63	63	50
Teiln. F	58	55	95	87	104	102	110	127	125	123
Mittel	85,33	89,83	109,00	114,67	134,33	133,33	136,17	146,17	147,50	163,50

### Untersuchung Standard – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	3	36	34	52	68	66	66	76
Teiln. B	-2	-9	-12	-12	8	21	38	76	73	90
Teiln. C	-2	-4	13	11	27	43	76	68	101	98
Teiln. D	-2	-4	16	12	12	2	22	39	37	35
Teiln. E	-2	-4	36	29	42	41	57	74	66	64
Teiln. F	0	-2	-6	-8	8	66	63	55	72	79
Mittel	-1,67	-5,33	8,33	11,33	21,83	37,50	54,00	63,00	69,17	73,67

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	72	89	85	83	95	95	85	84	80	95
Teiln. B	123	129	117	135	132	150	138	171	187	184
Teiln. C	90	77	137	132	145	153	151	163	181	174
Teiln. D	66	84	80	117	134	131	129	126	124	142
Teiln. E	64	84	82	99	97	97	96	113	126	124
Teiln. F	92	109	146	164	181	168	186	184	202	189
Mittel	84,50	95,33	107,83	121,67	130,67	132,33	130,83	140,17	150,00	151,33

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	90	90	87	107	104	104	123	121	120	120
Teiln. B	176	194	212	210	267	260	257	275	313	326
Teiln. C	174	172	188	204	221	207	222	220	236	229
Teiln. D	140	137	130	147	145	163	201	214	212	204
Teiln. E	117	115	113	113	131	151	146	163	156	153
Teiln. F	202	195	208	227	234	232	250	246	239	247
Mittel	149,83	150,50	156,33	168,00	183,67	186,17	199,83	206,50	212,67	213,17

### Untersuchung Standard – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	13	10	30	30	27	25	45	42	49
Teiln. B	-2	15	35	32	29	48	47	47	45	61
Teiln. C	-2	-5	12	9	27	27	39	57	54	70
Teiln. D	-2	18	16	36	28	46	44	41	39	32
Teiln. E	-2	-5	12	0	37	50	48	65	53	89
Teiln. F	-2	-2	-4	-11	6	5	23	20	58	96
Mittel	-2,00	5,67	13,50	16,00	26,17	33,83	37,67	45,83	48,50	66,17

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	47	86	78	75	93	91	91	91	90	110
Teiln. B	78	75	113	120	117	155	166	164	171	188
Teiln. C	84	76	73	91	101	98	116	148	141	153
Teiln. D	50	47	43	63	82	82	80	117	137	129
Teiln. E	81	98	131	138	150	142	154	171	169	181
Teiln. F	103	136	124	116	113	111	128	124	122	160
Mittel	73,83	86,33	93,67	100,50	109,33	113,17	122,50	135,83	138,33	153,50

### Untersuchung Standard – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	0	0	-19	-23	-25	-5	-7	-12	-12	-12
Teiln. B	-2	-4	14	52	70	67	85	82	100	98
Teiln. C	0	-7	-9	2	20	38	55	52	51	44
Teiln. D	-2	-4	13	11	27	20	38	58	70	68
Teiln. E	-2	-9	4	21	38	55	68	65	62	55
Teiln. F	-2	-9	-11	-3	10	7	23	61	79	77
Mittel	-1,33	-5,50	-1,33	10,00	23,33	30,33	43,67	51,00	58,33	55,00

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	-16	-21	-23	-23	-3	-3	-4	-4	-5	-5
Teiln. B	116	113	131	131	124	142	180	178	198	198
Teiln. C	64	62	54	49	46	46	46	65	62	82
Teiln. D	56	73	93	90	88	107	104	102	120	118
Teiln. E	72	69	66	59	76	93	90	89	88	81
Teiln. F	89	122	120	133	150	142	160	173	210	207
Mittel	63,50	69,67	73,50	73,17	80,17	87,83	96,00	100,50	112,17	113,50

Runde	21
Teiln. A	-5
Teiln. B	196
Teiln. C	82
Teiln. D	116
Teiln. E	78
Teiln. F	225
Mittel	115,33

### Untersuchung Standard – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-6	11	23	61	53	71	81	78
Teiln. B	0	0	-5	-5	-5	-5	-6	-6	-6	-6
Teiln. C	0	-3	-3	-6	9	2	19	15	32	49
Teiln. D	-2	16	9	5	23	20	36	29	46	83
Teiln. E	-2	16	9	46	43	35	73	81	74	92
Teiln. F	-2	-5	-7	33	30	23	55	53	93	87
Mittel	-1,33	3,33	-0,50	14,00	20,50	22,67	38,33	40,50	53,33	63,83

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	96	94	112	128	145	143	140	140	160	157
Teiln. B	-6	-8	-8	12	11	9	9	7	26	26
Teiln. C	65	61	54	71	68	66	64	57	54	72
Teiln. D	115	133	131	148	166	159	177	175	191	189
Teiln. E	89	107	104	121	158	145	163	161	179	197
Teiln. F	82	75	63	63	63	83	82	82	80	77
Mittel	73,50	77,00	76,00	90,50	101,83	100,83	105,83	103,67	115,00	119,67

Runde	21	22	23
Teiln. A	177	177	177
Teiln. B	24	24	24
Teiln. C	70	63	61
Teiln. D	186	186	186
Teiln. E	215	213	231
Teiln. F	74	72	69
Mittel	124,33	122,50	124,67

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-3	-5	8	1	19	37	35	43	80
Teiln. B	-2	16	28	41	38	54	72	65	56	88
Teiln. C	-2	-7	11	7	42	32	47	44	42	58
Teiln. D	-2	15	13	31	22	73	71	58	70	75
Teiln. E	-2	-9	-12	-15	-25	-5	-15	5	19	16
Teiln. F (ausg.)	-2	95	93	86	184	282	275	358	456	453
Mittel	-2,00	2,40	7,00	14,40	15,60	34,60	42,40	41,40	46,00	63,40
Mittel (ausg.)	-2	95	93	86	184	282	275	358	456	453

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	78	95	113	111	148	166	184	223	216	234
Teiln. B	86	73	91	83	121	133	145	143	136	152
Teiln. C	63	61	60	78	77	94	107	107	105	161
Teiln. D	90	102	111	109	121	120	112	125	145	143
Teiln. E	8	17	25	15	27	23	42	35	28	42
Teiln. F (ausg.)	445	538	534	631	622	815	906	1003	995	992
Mittel	65,00	69,60	80,00	79,20	98,80	107,20	118,00	126,60	126,00	146,40
Mittel (ausg.)	445	538	534	631	622	815	906	1003	995	992

Runde	21	22	23	24
Teiln. A	251	243	241	274
Teiln. B	170	188	180	178
Teiln. C	179	171	206	204
Teiln. D	135	147	167	160
Teiln. E	41	41	29	22
Teiln. F (ausg.)	990	1187	1185	1183
Mittel	155,20	158,00	164,60	167,60
Mittel (ausg.)	990	1187	1185	1183

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-14	-18	16	33	46	63	55	107	99
Teiln. B	-2	-4	-6	32	50	33	52	84	80	119
Teiln. C (ausg.)	-2	-4	-12	286	283	381	469	460	557	753
Teiln. D	-2	-9	-11	7	44	37	44	41	81	73
Teiln. E	-2	-4	16	11	28	40	32	50	65	103
Teiln. F	-2	-9	19	35	51	47	64	92	104	101
Mittel	-2,00	-8,00	0,00	20,20	41,20	40,60	51,00	64,40	87,40	99,00
Mittel (ausg.)	-2	-4	-12	286	283	381	469	460	557	753

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	136	119	136	144	157	153	171	189	180	198
Teiln. B	114	111	105	92	86	104	121	118	136	154
Teiln. C (ausg.)	949	941	1138	1130	1128	1319	1401	1399	1595	1593
Teiln. D	90	88	91	108	145	163	180	177	175	211
Teiln. E	120	153	151	144	160	158	191	184	196	194
Teiln. F	139	137	153	171	178	190	187	219	246	242
Mittel	119,80	121,60	127,20	131,80	145,20	153,60	170,00	177,40	186,60	199,80
Mittel (ausg.)	949	941	1138	1130	1128	1319	1401	1399	1595	1593

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	195	208	228	245	258
Teiln. B	167	160	148	145	136
Teiln. C (ausg.)	1686	1674	1772	1965	2063
Teiln. D	228	226	264	256	253
Teiln. E	227	245	241	257	277
Teiln. F	239	256	268	281	279
Mittel	211,20	219,00	229,80	236,80	240,60
Mittel (ausg.)	1686	1674	1772	1965	2063

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	-17	3	41	58	75	88	86	83
Teiln. B	0	-2	18	16	16	13	13	33	31	49
Teiln. C	-2	-4	-6	-19	-7	11	3	1	-11	2
Teiln. D (ausg.)	-2	-5	-12	-14	-18	278	375	371	363	561
Teiln. E	-2	11	24	17	14	32	50	42	40	32
Teiln. F	-2	-4	-7	-14	18	9	7	20	33	29
Mittel	-1,60	-1,60	2,40	0,60	16,40	24,60	29,60	36,80	35,80	39,00
Mittel (ausg.)	-2	-5	-12	-14	-18	278	375	371	363	561

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	80	71	109	109	107	102	100	98	91	89
Teiln. B	49	67	65	58	58	55	53	71	69	106
Teiln. C	14	52	50	86	79	96	108	121	139	157
Teiln. D (ausg.)	753	740	731	828	826	924	1122	1118	1217	1308
Teiln. E	30	47	84	81	93	90	108	125	142	149
Teiln. F	29	46	43	61	99	131	147	147	163	155
Mittel	40,40	56,60	70,20	79,00	87,20	94,80	103,20	112,40	120,80	131,20
Mittel (ausg.)	753	740	731	828	826	924	1122	1118	1217	1308

#### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	34	32	29	47	64	62	60	78
Teiln. B	-2	-5	12	30	38	31	29	42	42	59
Teiln. C	-2	16	13	11	44	55	53	71	69	81
Teiln. D (ausg.)	-2	89	187	185	183	182	273	270	263	356
Teiln. E	0	-3	14	26	23	43	41	29	17	15
Teiln. F	-2	16	32	31	28	45	58	55	43	53
Mittel	-1,60	8,00	21,00	26,00	32,40	44,20	49,00	51,80	46,20	57,20
Mittel (ausg.)	-2	89	187	185	183	182	273	270	263	356

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	76	93	91	109	107	105	123	140	138	135
Teiln. B	52	70	89	104	122	120	112	130	147	159
Teiln. C	88	86	84	96	113	110	103	101	99	117
Teiln. D (ausg.)	448	447	439	436	433	631	628	721	717	817
Teiln. E	26	43	56	54	71	71	69	66	61	59
Teiln. F	71	90	88	96	91	88	106	103	131	128
Mittel	62,60	76,40	81,60	91,80	100,80	98,80	102,60	108,00	115,20	119,60
Mittel (ausg.)	448	447	439	436	433	631	628	721	717	817

Runde	21	22
Teiln. A	155	153
Teiln. B	176	189
Teiln. C	113	111
Teiln. D (ausg.)	914	913
Teiln. E	72	70
Teiln. F	140	140
Mittel	131,20	132,60
Mittel (ausg.)	914	913

#### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	15	15	32	49	41	58	74	71
Teiln. B	-2	6	4	22	17	35	42	40	76	73
Teiln. C	-2	-4	-11	-19	14	11	8	6	24	57
Teiln. D (ausg.)	-2	-5	93	71	169	162	260	357	554	551
Teiln. E	-2	-5	13	11	9	26	21	14	27	20
Teiln. F	-2	16	14	12	12	10	28	26	24	42
Mittel	-2,00	1,80	7,00	8,20	16,80	26,20	28,00	28,80	45,00	52,60
Mittel (ausg.)	-2	-5	93	71	169	162	260	357	554	551

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	69	57	57	75	73	70	70	63	63	62
Teiln. B	90	87	104	96	108	105	123	140	156	169
Teiln. C	77	70	67	85	100	118	110	141	153	171
Teiln. D (ausg.)	543	641	834	926	923	1011	1104	1296	1388	1380
Teiln. E	13	6	21	18	16	28	25	22	15	32
Teiln. F	42	40	31	29	46	44	42	59	77	75
Mittel	58,20	52,00	56,00	60,60	68,60	73,00	74,00	85,00	92,80	101,80
Mittel (ausg.)	543	641	834	926	923	1011	1104	1296	1388	1380

Runde	21	22	23
Teiln. A	60	58	56
Teiln. B	166	177	175
Teiln. C	164	177	195
Teiln. D (ausg.)	1378	1466	1459
Teiln. E	45	42	34
Teiln. F	73	90	88
Mittel	101,60	108,80	109,60
Mittel (ausg.)	1378	1466	1459

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	15	32	50	68	81	97	94	126
Teiln. B	-2	11	24	21	18	1	21	18	55	64
Teiln. C	-2	-5	13	30	43	36	51	68	86	82
Teiln. D	-2	16	9	47	44	42	55	92	85	103
Teiln. E	0	-2	-2	-3	-3	-4	-6	-6	-7	-7
Teiln. F (ausg.)	-2	95	92	189	187	185	271	369	466	464
Mittel	-1,60	7,20	11,80	25,40	30,40	28,60	40,40	53,80	62,60	73,60
Mittel (ausg.)	-2	95	92	189	187	185	271	369	466	464

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	119	132	125	162	159	177	174	187	183	176
Teiln. B	98	92	84	80	80	70	87	104	121	139
Teiln. C	80	77	94	92	110	106	138	151	168	186
Teiln. D	121	118	146	178	191	184	181	218	215	208
Teiln. E	-16	-16	0	13	6	44	61	56	76	96
Teiln. F (ausg.)	457	749	747	744	835	832	1029	1126	1319	1316
Mittel	80,40	80,60	89,80	105,00	109,20	116,20	128,20	143,20	152,60	161,00
Mittel (ausg.)	457	749	747	744	835	832	1029	1126	1319	1316

Runde	21
Teiln. A	173
Teiln. B	139
Teiln. C	179
Teiln. D	206
Teiln. E	89
Teiln. F (ausg.)	1414
Mittel	157,20
Mittel (ausg.)	1414

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-9	8	1	37	30	26	78	74	111
Teiln. B	-2	-14	3	16	43	36	54	51	68	100
Teiln. C	-2	16	27	25	55	52	48	76	89	105
Teiln. D (ausg.)	-2	-5	87	75	272	264	262	259	341	438
Teiln. E	-2	-4	13	1	-1	39	72	64	64	81
Teiln. F	-2	-9	9	6	3	10	23	20	33	30
Mittel	-2,00	-4,00	12,00	9,80	27,40	33,40	44,60	57,80	65,60	85,40
Mittel (ausg.)	-2	-5	87	75	272	264	262	259	341	438

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	108	104	121	136	129	141	154	190	187	204
Teiln. B	98	135	128	121	138	170	188	199	217	215
Teiln. C	122	138	135	147	140	137	124	141	139	152
Teiln. D (ausg.)	434	631	719	817	814	802	885	876	969	964
Teiln. E	109	122	120	156	169	166	158	197	189	202
Teiln. F	43	41	58	76	69	87	84	122	115	133
Mittel	96,00	108,00	112,40	127,20	129,00	140,20	141,60	169,80	169,40	181,20
Mittel (ausg.)	434	631	719	817	814	802	885	876	969	964



### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (ausg.)	-2	-9	87	184	276	273	266	453	551	649
Teiln. B	-2	-9	8	21	38	70	68	81	78	96
Teiln. C	-2	-4	4	13	33	30	48	44	76	73
Teiln. D	-2	-10	7	19	30	68	66	73	92	88
Teiln. E	-2	6	-7	6	38	31	49	41	58	55
Teiln. F	-2	-4	28	19	35	32	28	46	81	114
Mittel	-2,00	-4,20	8,00	15,60	34,80	46,20	51,80	57,00	77,00	85,20
Mittel (ausg.)	-2	-9	87	184	276	273	266	453	551	649

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (ausg.)	641	739	932	1125	1117	1110	1207	1200	1298	1384
Teiln. B	127	118	136	116	129	142	159	147	155	173
Teiln. C	90	108	121	133	131	126	143	161	177	214
Teiln. D	121	139	138	131	141	158	175	186	171	188
Teiln. E	53	45	62	80	97	134	142	139	177	175
Teiln. F	111	128	125	142	174	211	208	216	214	201
Mittel	100,40	107,60	116,40	120,40	134,40	154,20	165,40	169,80	178,80	190,20
Mittel (ausg.)	641	739	932	1125	1117	1110	1207	1200	1298	1384

Runde	21	22
Teiln. A (ausg.)	1480	1472
Teiln. B	211	204
Teiln. C	223	220
Teiln. D	226	224
Teiln. E	212	230
Teiln. F	195	190
Mittel	213,40	213,60
Mittel (ausg.)	1480	1472

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-6	11	24	22	20	17	35	33
Teiln. B (ausg.)	-2	95	192	290	383	381	378	475	575	575
Teiln. C	-2	16	9	22	19	17	34	52	69	87
Teiln. D	-2	10	8	20	38	31	29	28	26	24
Teiln. E	-2	-4	-11	-11	5	0	-1	-2	-3	-5
Teiln. F	-2	-5	12	3	0	-12	26	64	80	77
Mittel	-2,00	2,60	2,40	9,00	17,20	11,60	21,60	31,80	41,40	43,20
Mittel (ausg.)	-2	95	192	290	383	381	378	475	575	575

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	46	46	46	44	42	40	98	116	114	112
Teiln. B (ausg.)	575	575	575	575	575	574	573	572	572	572
Teiln. C	79	67	65	62	62	57	50	48	48	64
Teiln. D	22	20	3	3	-4	-6	-6	-8	-10	-10
Teiln. E	-5	-5	-5	-13	-15	-15	-18	-18	-20	-3
Teiln. F	75	73	71	109	102	115	152	169	167	185
Mittel	43,40	40,20	36,00	41,00	37,40	38,20	55,20	61,40	59,80	69,60
Mittel (ausg.)	575	575	575	575	575	574	573	572	572	572

Runde	21
Teiln. A	110
Teiln. B (ausg.)	572
Teiln. C	84
Teiln. D	-12
Teiln. E	-8
Teiln. F	182
Mittel	71,20
Mittel (ausg.)	572

### Untersuchung Ohne Information – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	-4	15	15	12	11	31	31	29
Teiln. B	-2	-4	-6	-8	10	28	41	39	37	34
Teiln. C	0	0	-5	-6	-6	-7	-9	-9	-11	9
Teiln. D (ausg.)	-2	95	88	185	182	179	172	270	263	356
Teiln. E	-2	-4	-11	9	7	25	25	23	21	21
Teiln. F	-2	15	13	13	25	43	41	39	32	24
Mittel	-1,60	0,60	-2,60	4,60	10,20	20,20	21,80	24,60	22,00	23,40
Mittel (ausg.)	-2	95	88	185	182	179	172	270	263	356

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	47	44	64	61	79	77	75	67	85	85
Teiln. B	32	70	58	76	69	67	65	58	56	54
Teiln. C	7	6	6	6	5	5	5	3	3	3
Teiln. D (ausg.)	353	450	548	545	543	541	539	537	535	533
Teiln. E	21	19	16	16	14	7	7	17	14	14
Teiln. F	22	22	19	39	39	39	39	39	39	39
Mittel	25,80	32,20	32,60	39,60	41,20	39,00	38,20	36,80	39,40	39,00
Mittel (ausg.)	353	450	548	545	543	541	539	537	535	533

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Teiln. A	85	83	83	83	83	83	83	82	82	82
Teiln. B	52	50	48	46	66	64	62	60	58	58
Teiln. C	3	3	3	3	2	2	0	20	20	20
Teiln. D (ausg.)	531	629	627	824	821	814	812	809	807	800
Teiln. E	14	32	30	46	64	62	62	80	78	76
Teiln. F	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Mittel	38,60	41,40	40,60	43,40	50,80	50,00	49,20	56,20	55,40	55,00
Mittel (ausg.)	531	629	627	824	821	814	812	809	807	800

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 1

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-4	9	4	-5	13	9	47	65	77
Teiln. B	-2	11	9	22	19	76	69	106	104	122
Teiln. C	-2	-4	10	22	37	29	47	45	56	74
Teiln. D	-2	15	26	20	38	30	29	25	59	58
Teiln. E (ausg.)	-2	90	181	174	172	170	458	451	549	641
Teiln. F	-2	-10	8	6	64	80	77	112	110	107
Mittel	-2,00	1,60	12,40	14,80	30,60	45,60	46,20	67,00	78,80	87,60
Mittel (ausg.)	-2	90	181	174	172	170	458	451	549	641

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	94	92	88	86	124	116	129	142	139	135
Teiln. B	140	158	156	193	210	207	205	223	220	252
Teiln. C	94	87	105	101	114	112	111	106	124	123
Teiln. D	53	61	78	90	87	75	93	106	114	132
Teiln. E (ausg.)	638	635	726	823	810	908	1004	992	984	972
Teiln. F	164	161	194	207	223	241	224	241	259	277
Mittel	109,00	111,80	124,20	135,40	151,60	150,20	152,40	163,60	171,20	183,80
Mittel (ausg.)	638	635	726	823	810	908	1004	992	984	972

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 2

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	9	27	24	37	56	43	41	69	85
Teiln. B	-2	-4	-11	7	25	40	57	49	56	87
Teiln. C	-2	-4	13	30	23	36	48	75	66	83
Teiln. D (ausg.)	-2	-9	-16	-21	-23	-25	-27	-28	70	68
Teiln. E	-2	15	7	25	37	50	83	101	98	96
Teiln. F	-2	16	33	15	13	11	8	25	23	31
Mittel	-2,00	6,40	13,80	20,20	27,00	38,60	47,80	58,20	62,40	76,40
Mittel (ausg.)	-2	-9	-16	-21	-23	-25	-27	-28	70	68

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	82	79	156	148	146	177	210	198	210	203
Teiln. B	100	113	108	125	158	170	163	176	173	181
Teiln. C	121	113	148	146	158	196	213	204	216	214
Teiln. D (ausg.)	65	52	150	247	240	338	330	324	321	319
Teiln. E	92	109	146	178	174	186	182	180	198	198
Teiln. F	44	101	133	150	162	173	186	219	237	229
Mittel	87,80	103,00	138,20	149,40	159,60	180,40	190,80	195,40	206,80	205,00
Mittel (ausg.)	65	52	150	247	240	338	330	324	321	319

Runde	21
Teiln. A	201
Teiln. B	198
Teiln. C	252
Teiln. D (ausg.)	416
Teiln. E	216
Teiln. F	226
Mittel	218,60
Mittel (ausg.)	416

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 3

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	15	12	50	47	63	60	72	63	76
Teiln. B	-2	15	8	26	34	52	69	64	57	55
Teiln. C (ausg.)	-2	95	92	89	181	168	160	258	351	343
Teiln. D	-2	-4	36	34	29	47	60	78	95	93
Teiln. E	-2	-4	8	5	43	55	67	84	82	94
Teiln. F	-2	10	3	-5	13	30	48	80	98	81
Mittel	-2,00	6,40	13,40	22,00	33,20	49,40	60,80	75,60	79,00	79,80
Mittel (ausg.)	-2	95	92	89	181	168	160	258	351	343

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	94	113	112	108	105	102	122	119	109	148
Teiln. B	92	110	106	123	116	133	150	148	138	156
Teiln. C (ausg.)	439	532	629	727	820	908	905	903	1096	1179
Teiln. D	130	127	160	173	186	174	212	210	203	199
Teiln. E	106	103	119	131	128	146	137	134	154	169
Teiln. F	77	89	122	139	156	148	146	186	174	170
Mittel	99,80	108,40	123,80	134,80	138,20	140,60	153,40	159,40	155,60	168,40
Mittel (ausg.)	439	532	629	727	820	908	905	903	1096	1179

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	148	140	140	139	157
Teiln. B	174	212	210	208	206
Teiln. C (ausg.)	1176	1369	1367	1365	1362
Teiln. D	199	197	195	228	226
Teiln. E	166	163	176	169	169
Teiln. F	188	184	181	178	195
Mittel	175,00	179,20	180,40	184,40	190,60
Mittel (ausg.)	1176	1369	1367	1365	1362

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 4

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	15	32	29	26	39	47	59	77	75
Teiln. B	-2	16	28	21	38	56	68	65	83	94
Teiln. C (ausg.)	-2	90	87	185	178	274	273	271	370	362
Teiln. D	-2	-4	34	31	49	66	64	82	114	111
Teiln. E	0	-4	-6	12	5	38	31	43	35	55
Teiln. F	-2	18	17	17	5	2	19	31	22	60
Mittel	-1,60	8,20	21,00	22,00	24,60	40,20	45,80	56,00	66,20	79,00
Mittel (ausg.)	-2	90	87	185	178	274	273	271	370	362

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	108	121	118	131	129	166	184	196	191	188
Teiln. B	91	109	140	153	146	184	176	193	189	207
Teiln. C (ausg.)	355	351	443	440	538	531	524	722	820	818
Teiln. D	129	122	139	159	176	173	171	166	164	162
Teiln. E	52	45	65	56	74	89	107	120	138	156
Teiln. F	57	55	67	65	61	99	91	89	101	98
Mittel	87,40	90,40	105,80	112,80	117,20	142,20	145,80	152,80	156,60	162,20
Mittel (ausg.)	355	351	443	440	538	531	524	722	820	818

Runde	21	22
Teiln. A	206	224
Teiln. B	203	201
Teiln. C (ausg.)	815	908
Teiln. D	175	171
Teiln. E	153	170
Teiln. F	131	129
Mittel	173,60	179,00
Mittel (ausg.)	815	908

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 5

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	16	33	31	29	46	63	61	59	77
Teiln. B	-2	-4	13	11	29	47	64	60	53	50
Teiln. C	-2	-5	-8	12	10	30	30	28	44	62
Teiln. D (ausg.)	-2	-3	-5	-7	92	88	185	278	274	371
Teiln. E	-2	11	29	21	19	16	9	27	79	91
Teiln. F	-2	15	13	11	3	21	33	31	44	41
Mittel	-2,00	6,60	16,00	17,20	18,00	32,00	39,80	41,40	55,80	64,20
Mittel (ausg.)	-2	-3	-5	-7	92	88	185	278	274	371

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	74	91	88	127	124	121	157	154	151	147
Teiln. B	58	55	93	130	128	146	138	136	149	157
Teiln. C	60	52	68	84	80	97	155	173	171	171
Teiln. D (ausg.)	359	556	548	644	736	729	723	816	808	900
Teiln. E	89	82	100	98	111	104	102	115	123	121
Teiln. F	34	47	59	71	99	87	79	75	73	86
Mittel	63,00	65,40	81,60	102,00	108,40	111,00	126,20	130,60	133,40	136,40
Mittel (ausg.)	359	556	548	644	736	729	723	816	808	900

Runde	21	22
Teiln. A	164	160
Teiln. B	214	231
Teiln. C	166	164
Teiln. D (ausg.)	892	990
Teiln. E	159	177
Teiln. F	79	77
Mittel	156,40	161,80
Mittel (ausg.)	892	990

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 6

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (ausg.)	-2	-5	-7	-16	-23	275	263	361	457	450
Teiln. B	-2	-5	-6	31	44	56	44	71	89	82
Teiln. C	-2	15	13	41	38	35	33	48	86	103
Teiln. D	-2	16	34	31	49	40	28	40	51	49
Teiln. E	-2	15	3	0	32	49	47	80	97	109
Teiln. F	-2	11	9	27	18	35	28	43	40	40
Mittel	-2,00	10,40	10,60	26,00	36,20	43,00	36,00	56,40	72,60	76,60
Mittel (ausg.)	-2	-5	-7	-16	-23	275	263	361	457	450

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (ausg.)	443	441	637	734	732	725	916	1109	1106	1203
Teiln. B	99	96	131	124	141	153	151	143	141	140
Teiln. C	99	117	114	112	129	141	159	157	157	155
Teiln. D	67	64	82	73	61	78	114	112	110	103
Teiln. E	126	134	151	164	176	173	206	199	232	230
Teiln. F	58	70	83	101	96	109	99	98	95	110
Mittel	89,80	96,20	112,20	114,80	120,60	130,80	145,80	141,80	147,00	147,60
Mittel (ausg.)	443	441	637	734	732	725	916	1109	1106	1203

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A (ausg.)	1201	1297	1390	1482	1580
Teiln. B	138	131	131	204	236
Teiln. C	173	169	167	163	179
Teiln. D	100	120	120	116	113
Teiln. E	223	261	254	271	287
Teiln. F	103	120	117	136	154
Mittel	147,40	160,20	157,80	178,00	193,80
Mittel (ausg.)	1201	1297	1390	1482	1580

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 7

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (ausg.)	-2	-9	-16	81	178	175	373	458	455	552
Teiln. B	-2	-9	28	26	44	37	34	91	103	100
Teiln. C	-2	10	8	25	17	15	28	46	38	76
Teiln. D	-2	16	6	22	40	52	49	65	57	73
Teiln. E	-2	-9	19	35	52	60	57	75	108	126
Teiln. F	-2	-5	12	50	47	54	71	68	105	121
Mittel	-2,00	0,60	14,60	31,60	40,00	43,60	47,80	69,00	82,20	99,20
Mittel (ausg.)	-2	-9	-16	81	178	175	373	458	455	552

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (ausg.)	743	740	937	929	1020	1113	1110	1103	1195	1192
Teiln. B	117	114	146	162	152	149	145	183	170	187
Teiln. C	73	71	82	100	138	136	154	151	169	182
Teiln. D	71	84	82	115	127	123	143	136	149	147
Teiln. E	143	160	157	169	187	200	188	181	198	216
Teiln. F	131	149	161	158	176	189	207	199	196	193
Mittel	107,00	115,60	125,60	140,80	156,00	159,40	167,40	170,00	176,40	185,00
Mittel (ausg.)	743	740	937	929	1020	1113	1110	1103	1195	1192

Runde	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Teiln. A (ausg.)	1288	1485	1583	1670	1665	1652	1749	1746	1944
Teiln. B	205	201	213	210	222	219	217	235	247
Teiln. C	180	175	168	181	179	198	196	216	209
Teiln. D	164	182	179	176	194	212	229	246	263
Teiln. E	213	211	269	267	307	307	307	302	322
Teiln. F	211	204	242	260	253	261	259	256	294
Mittel	194,60	194,60	214,20	218,80	231,00	239,40	241,60	251,00	267,00
Mittel (ausg.)	1288	1485	1583	1670	1665	1652	1749	1746	1944

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 8

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A	-2	-5	-8	8	5	-3	35	52	69	102
Teiln. B	-2	-4	-6	26	39	37	54	90	83	81
Teiln. C	-2	16	3	1	57	65	73	90	107	125
Teiln. D (ausg.)	-2	-5	193	190	383	476	473	671	664	661
Teiln. E	-2	-9	-12	0	16	53	49	60	77	69
Teiln. F	-2	16	34	47	43	41	39	55	67	64
Mittel	-2,00	2,80	2,20	16,40	32,00	38,60	50,00	69,40	80,60	88,20
Mittel (ausg.)	-2	-5	193	190	383	476	473	671	664	661

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A	97	114	131	128	165	162	174	187	184	217
Teiln. B	114	106	123	140	137	150	143	141	157	153
Teiln. C	142	155	171	183	180	173	181	193	220	213
Teiln. D (ausg.)	848	841	1038	1025	1118	1215	1211	1194	1490	1487
Teiln. E	102	135	151	188	170	177	189	181	177	195
Teiln. F	60	51	66	79	92	109	129	127	162	160
Mittel	103,00	112,20	128,40	143,60	148,80	154,20	163,20	165,80	180,00	187,60
Mittel (ausg.)	848	841	1038	1025	1118	1215	1211	1194	1490	1487

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A	234	226	242	254	246
Teiln. B	151	134	131	131	171
Teiln. C	204	217	224	281	292
Teiln. D (ausg.)	1684	1677	1874	1871	1967
Teiln. E	207	224	242	255	273
Teiln. F	197	216	214	226	224
Mittel	198,60	203,40	210,60	229,40	241,20
Mittel (ausg.)	1684	1677	1874	1871	1967

### Untersuchung Mit Information – Gruppe 9

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (ausg.)	-2	-9	190	187	286	283	372	369	368	466
Teiln. B	-2	-14	3	20	55	52	50	70	63	61
Teiln. C	-2	16	33	32	49	62	59	94	93	86
Teiln. D	0	0	-9	11	8	28	21	37	37	30
Teiln. E	-2	-10	7	19	37	29	47	43	61	77
Teiln. F	-2	-4	14	32	50	68	66	79	92	109
Mittel	-1,60	-2,40	9,60	22,80	39,80	47,80	48,60	64,60	69,20	72,60
Mittel (ausg.)	-2	-9	190	187	286	283	372	369	368	466

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (ausg.)	553	651	748	840	932	1020	1013	1111	1110	1201
Teiln. B	73	70	103	116	134	130	128	144	167	185
Teiln. C	81	75	91	83	80	72	72	85	82	82
Teiln. D	29	49	46	59	54	74	74	66	81	81
Teiln. E	90	108	124	142	159	177	190	208	206	242
Teiln. F	126	164	182	180	197	195	192	210	207	205
Mittel	79,80	93,20	109,20	116,00	124,80	129,60	131,20	142,60	148,60	159,00
Mittel (ausg.)	553	651	748	840	932	1020	1013	1111	1110	1201

Runde	21	22	23	24	25
Teiln. A (ausg.)	1198	1193	1291	1389	1487
Teiln. B	198	196	194	212	204
Teiln. C	82	76	76	75	73
Teiln. D	81	81	81	80	80
Teiln. E	260	278	274	272	265
Teiln. F	202	200	218	216	214
Mittel	164,60	166,20	168,60	171,00	167,20
Mittel (ausg.)	1198	1193	1291	1389	1487

## Untersuchung Mit Information – Gruppe 10

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teiln. A (ausg.)	-2	-4	-4	-9	-12	85	78	75	71	170
Teiln. B	-2	-9	-11	7	0	17	14	27	40	53
Teiln. C	-2	15	8	25	23	41	38	56	88	86
Teiln. D	0	0	-1	-1	-3	-3	-5	-5	15	14
Teiln. E	-2	16	34	27	45	61	59	51	49	67
Teiln. F	-2	-5	-7	9	7	24	62	62	59	56
Mittel	-1,60	3,40	4,60	13,40	14,40	28,00	33,60	38,20	50,20	55,20
Mittel (ausg.)	-2	-4	-4	-9	-12	85	78	75	71	170

Runde	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Teiln. A (ausg.)	270	270	268	266	264	362	462	450	448	445
Teiln. B	50	48	61	59	56	69	66	64	61	59
Teiln. C	84	82	99	92	129	146	143	141	138	176
Teiln. D	14	12	12	30	30	30	30	25	20	20
Teiln. E	55	53	70	63	100	98	96	94	92	110
Teiln. F	54	54	69	63	60	58	73	66	106	102
Mittel	51,40	49,80	62,20	61,40	75,00	80,20	81,60	78,00	83,40	93,40
Mittel (ausg.)	270	270	268	266	264	362	462	450	448	445

Runde	21	22	23	24
Teiln. A (ausg.)	445	444	543	542
Teiln. B	57	75	92	90
Teiln. C	176	176	174	172
Teiln. D	20	20	20	20
Teiln. E	108	106	104	122
Teiln. F	97	97	97	92
Mittel	91,60	94,80	97,40	99,20
Mittel (ausg.)	445	444	543	542

## Ergebnis des Strategiespiels

Während des Strategiespiels wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Strategien mit eigenen Worten zu beschreiben. Sie sollten sich dabei auf ihr Verhalten in Untersuchung mit Information konzentrieren. Die Teilnehmer füllten zwei Versionen des Fragebogens aus: Einen bezüglich ihres Verhaltens gegenüber dem ausgewählten Teilnehmer und einen bezüglich ihres Verhaltens gegenüber allen anderen Teilnehmern. Die Teilnehmer beschrieben ihre Strategie mit eigenen Worten, sollten sich aber auf die folgenden drei Aspekte konzentrieren:

- An wen wurden Anfragen geschickt?
- Für wen wurden Anfragen beantwortet?
- Für wen wurden Anfragen weitergeleitet?

In der folgenden Analyse liegt der Fokus auf den Unterschieden im Verhalten bezüglich des ausgewählten Teilnehmers.

Die folgenden Teilnehmer bearbeiteten ihren Fragebogen nicht:

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	D	1
2	A, F	2
4	C	1
6	C	1

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
7	D, F	2
8	E	1
10	A, D	2
Summe		10

**Beobachtete Strategien:** Im Strategiespiel wurden folgende Änderungen im Verhalten gegenüber dem ausgezeichneten Teilnehmer beobachtet.

**Ziel von Anfragen:**

- 1.) Strategie wurde nicht verändert

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	A, C, E, F	4
2	B, C, D, E	4
3	B, C, D, E, F	5
4	A, B, E, F	4
5	A, B, C, D, E	5
6	A, B, D, E, F	5
7	A, B, C	3
8	A, C, D	3
9	A, C, F	3
10	C, E	2
<b>Summe</b>		<b>38</b>

- 2.) Strategiewechsel von reziproker Strategie gegenüber normalen Teilnehmern zum bevorzugten Senden an den ausgewählten Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
3	A	1
5	F	1
7	E	1
9	B	1
10	B	1
<b>Summe</b>		<b>6</b>

- 3.) Strategiewechsel von niemals/selten an normale Teilnehmer zu immer an ausgewählten Teilnehmer senden

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
8	B, F	2
9	D, E	2
<b>Summe</b>		<b>4</b>

- 4.) Strategiewechsel von reziprokem Verhalten gegenüber normalen Teilnehmern zu niemals an ausgewählten Teilnehmer senden

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
10	F	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

- 5.) Strategiewechsel von immer an normale Teilnehmer zu niemals an ausgewählten Teilnehmer senden

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
4	D	1
<b>Summe</b>		<b>1</b>

**Beantworten von Anfragen:**

- 1.) Strategie wurde nicht verändert

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	A, E, F	3
2	B, D, E	3
3	B, C, D, E, F	5
4	B, E, F	3
5	A, B, C, D, E	5
6	D, E, F	3
7	A, C	2
8	A, B, C, D, F	5
9	A, D, E, F	4
10	C	1
<b>Summe</b>		<b>34</b>

- 2.) Strategiewechsel von reziproker Strategie gegenüber normalen Teilnehmern zum bevorzugten beantworten für den ausgewählten Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
4	A	1
9	B	1
10	B	1
<b>Summe</b>		<b>4</b>

- 3.) Strategiewechsel von immer für normale Teilnehmer zu selten/nie für ausgewählten Teilnehmer antworten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	C	1
2	C	1
4	D	1
7	B	1
9	C	1
10	E	1
<b>Summe</b>		<b>6</b>

- 4.) Strategiewechsel von reziprok gegenüber normalen Teilnehmern zu niemals für ausgewählten Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
3	A	1
5	F	1
6	A, B	2
7	E	1
10	F	1
<b>Summe</b>		<b>6</b>



Weiterleiten von Anfragen:

- 1.) Strategie wurde nicht verändert

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	E, F	2
2	B, C, D, E	4
3	B, C, D, E, F	5
4	A, B, E, F	4
5	A, C, D, E	4
6	A, B, D, E, F	5
7	A, B, C	3
8	A, B, D	3
9	A, C, D, E, F	5
10	C, E	2
Summe		37

- 2.) Strategiewechsel von reziproker Strategie gegenüber normalen Teilnehmern zum bevorzugten weiterleiten für den ausgewählten Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	B	1
5	B	1
8	F	1
9	B	1
10	F	1
Summe		5

- 3.) Strategiewechsel von immer für normale Teilnehmer zu selten/nie für ausgewählten Teilnehmer weiterleiten

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	C	1
4	D	1
8	C	1
Summe		3

- 4.) Strategiewechsel von reziprok gegenüber normalen Teilnehmern zu niemals für ausgewählten Teilnehmer

Gruppe	Teilnehmer	Anzahl
1	A	1
3	A	1
5	F	1
7	E	1
10	B	1
Summe		5



## Anhang B – Offline Experimente

### Spielbeschreibung

Wie in den vorangegangenen Aufgaben zu strukturierten Peer-to-Peer Systemen kennen Sie eine Menge von (Schlüssel, Wert)-Paaren und suchen nach (Schlüssel, Wert)-Paaren. Die Mengen an (Schlüssel, Wert)-Paaren, die Sie bzw. Ihre Nachbarn kennen, sind unterschiedlich groß, d. h. der von Ihnen verwaltete Bereich kann mehr Schlüssel enthalten als der Bereich anderer Teilnehmer. Sie können die Größe ihrer Bereiche, sowie die Größe der von Ihren Nachbarn verwalteten Bereiche mit Hilfe entsprechender Methoden in Erfahrung bringen. Die Spielumgebung schlägt Ihnen bestimmte Schlüssel vor, für die Sie die Werte ermitteln sollen. Ihre Anfragen stellen Sie an Ihnen bekannte andere Teilnehmer (Ihre Kontakte), die wie Sie durch eine Kennzahl charakterisiert sind. Für Schlüssel, deren zugehörigen Wert Sie nicht kennen, schlägt Ihnen das System eine Menge von Ihnen bekannten Teilnehmern und deren Entfernung zum Schlüssel vor. Dabei gilt: Je geringer die Entfernung zum Schlüssel, umso wahrscheinlicher kennt der entsprechende Teilnehmer das Anfrageergebnis. Es ist aber nicht sicher, dass einer der Teilnehmer den Wert tatsächlich kennt. Sollte ein Teilnehmer den Wert Ihrer Anfrage nicht kennen, kann er Ihre Anfrage weiterleiten. Das System bietet ihm auch wieder eine Menge ihm bekannter Teilnehmer an. Anfragen müssen nicht beantwortet oder weitergeleitet werden. Dies entscheidet jeder Teilnehmer für sich. Wenn ein Teilnehmer eine Anfrage beantwortet, schickt er das Ergebnis direkt an den Anfrager. Genau wie Sie kann jemand anderes seine (Schlüssel, Wert)-Kombination erfragen. Er hat dabei dieselben Möglichkeiten wie Sie und erhält die gleichen Informationen. Ankommende Anfragen können Sie also beantworten, nicht beantworten oder weiterleiten. Bei Eingang einer Anfrage können Sie prüfen, ob Sie die Anfrage beantworten können oder nicht.

Für jedes (Schlüssel, Wert)-Paar, das Sie in Erfahrung bringen, erhält ein Teil der Spieler 100 Punkte, die übrigen Spieler 20 Punkte. Mit Hilfe entsprechender Methoden, können Sie prüfen, wie viele Punkte Sie und Ihre Nachbarn erhalten. Die Beantwortung einer fremden Anfrage kostet Sie fünf Punkte. Eigene Anfragen absenden kostet zwei Punkte. Weiterleiten kostet einen Punkt. Ihr Punktestand wird nach jeder Aktion angepasst. Ihr Kontostand zu Spielbeginn beträgt 100 Punkte. 1000 Punkte haben den Wert von 1€.

Jeder Teilnehmer steuert genau einen Peer. Die Anzahl der Teilnehmer im System ist Ihnen nicht bekannt.

Das Spiel wird in Runden durchgeführt. Jeder Teilnehmer kann pro Runde eine Anfrage absetzen.

**Wichtig:** Wenn Sie also Anfragen in einer Runde bearbeiten wollen, müssen sie dies tun, bevor Sie eine eigene Abfrage absetzen. Informationen über beantwortete Anfragen werden sofort weitergegeben.

Das Spiel dauert sicher 1000 Runden. Danach wird alle 50 Runden gewürfelt, ob das Spiel abbricht. Falls eine 6 kommt, wird abgebrochen, sonst werden weitere 50 Runden gespielt.

Gemäß dem Erfolg ihrer Strategie werden Sie schließlich in der letzten Veranstaltung von uns bezahlt.



## Literaturverzeichnis

- [AbD01] Aberer, K. und Despotovic, Z.: Managing Trust in a Peer-2-Peer Information System, In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Information and Knowledge Management*, 2001, 310-317
- [AbD05] Aberer, K. und Despotovic, Z.: On Reputation in Game Theory - Application to Online Settings, Arbeitspapier, 2005
- [AbH00] Abdul-Rahman, A. und Hailes, S.: Supporting Trust in Virtual Communities. In: *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000
- [AdH00] Adar, E. und Huberman, B.: *Free Riding on Gnutella*, Technischer Bericht, 2000
- [Ake70] Akerlof, G. A.: The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism, In: *Quarterly Journal of Economics*, 1970
- [AMP05] Abrams, Z.; McGrew, R. und Plotkin, S.: A Non-Manipulable Trust System Based on EigenTrust, In: *SIGecom Exchanges*, 2005, 5.4, 21-30
- [And88] Andreoni, J.: Why Free Ride? Strategies in Public Goods Experiments. In *Journal of Public Economics*, 1988, 37, 291-304.
- [AnG04] Anagnostakis, K. und Greenwald, M.: Exchange-based Incentive Mechanisms for Peer-to-Peer File Sharing, In: *Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems*, 2004, 524- 533
- [AnS04] Androutsellis-Theotokis, S. und Spinellis, D.: A Survey of Peer-to-Peer Content Distribution Technologies, In: *ACM Computing Surveys*, 2004, 36 (4), 335-372
- [Axe84] Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1985
- [AzM02] Azzedin, F. und Maheswaran, M.: Evolving and Managing Trust in Grid Computing Systems, In: *Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical &*
- [BBW06] Buchmann, E.; Böhm, K. und von der Weth, C.: Towards Truthful Feedback in P2P Data Structures. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Cooperative Information Systems*, 2006
- [BCN99] Banks, J.; Carson, J.; Nelson, B. und Nicol, D.: *Discrete-Event System Simulation*, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1999
- [BDM95] Berg, J., Dickhaut, J. und McCabe, K.: Trust, Reciprocity and Social History, In: *Games and Economic Behavior* X, 1995, 122-142
- [BEG04] Berninghaus, S.; Ehrhart, K. und Güth, W.: *Strategische Spiele*, 2. Auflage, Springer, Berlin, 2004
- [BKO02] Bolton, G.; Katok, E. und Ockenfels, A. *How Effective are Online Reputation Mechanisms? - An Experimental Investigation*, Arbeitspapier, 2002.

- [BKO04] Bolten, G.; Katok, E. und Ockenfels, A. Trust among Internet Traders: A Behavioral Economics Approach, In: *Analyse und Kritik*, 2004, 26 (1), 185-202.
- [BLV05] Blanc, A.; Liu, Y. und Vahdal, A.: Designing Incentives for Peer-to-Peer Routing, In: *IEEE Conference on Computer Communications*, 2005
- [BMT99] Bazerman, M.; Moore, D.; Tenbrunsel, A.; Wade-Benzoni, K. und Blount, S.: Explaining how preferences change across joint versus separate evaluation, In: *Journal of Economic Behavior and Organization*, 39, 1999, 41-58
- [BöB06] Böhm, K. und Buchmann, E.: Free-Riding Aware Forwarding in Content Addressable Networks, In: *VLDB Journal*, 2006
- [Bru46] de Bruijn, N.: A combinatorial problem, In: *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1946, 49, 758-764
- [BuB04a] Buchegger, S. und Boudec, J. L.: A Robust Reputation System for P2P and Mobile Ad-hoc Networks, In: *Proceedings of Workshop on the Economics of Peer-to-Peer Systems*, 2004
- [BuB04b] Buchmann, E. und Böhm, K.: FairNet - How to Counter Free Riding in Peer-To-Peer Data Structures, In: *Proceedings of the International Conference on Cooperative Information Systems*, 2004
- [Buc06] Buchmann, E.: *Erkennung und Vermeidung von unkooperativem Verhalten in Peer-to-Peer-Datenstrukturen*, Dissertation, Universität Magdeburg, 2006
- [BWT07] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Monitoring Informations- & Kommunikationswirtschaft – 10. Faktenbericht*, München/Berlin, 2007
- [BWY03] Brosig, J.; Weimann, J. und Yang, C.: The hot versus cold effect in a simple bargaining experiment, In: *Experimental Economics*, 2003, 6(1), 75-90
- [Cha02] Chang, B.; Crary, K.; DeLap, M.; Harper, R.; Liszka, J.; Murphy, T. und Pfenning, F.: Trustless Grid Computing in ConCert, In: *Proceedings of the Third International Workshop on Grid Computing*. 2002, 112-125
- [Col02] Collier, M.: A Systematic Analysis of Equivalence in Multistage Networks, In: *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20 (9), 1664-1672
- [CoT94] Cosmides, L. und Tooby, J.: Better than Rational: Evolutionary Psychology and the Invisible Hand, In: *The American Economic Review*, 84 (2), 1994
- [DeA04] Despotovic, Z. und Aberer, K.: Maximum Likelihood Estimation of Peers' Performance in P2P Networks, In: *The Second Workshop on the Economics of Peer-to-Peer Systems*, 2004
- [DGH04] Dustdar, S.; Gall, H. und Hauswirth, M.: *Software-Architekturen für Verteilte Systeme*, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [Dou02] Douceur, J. R.: The Sybil Attack, In: *Proceedings of the International Workshop on Peer-to-Peer Systems*, 2002, 251-260

- [EnF02] Engemann, D. und Fischbacher, U.: *Indirect Reciprocity and Strategic Reputation Building in an Experimental Helping Game*, Arbeitspapier 132, Institute for Empirical Research in Economics, Universität Zürich, 2002
- [FeC05] Feldman, M. und Chuang, J.: The Evolution of Cooperation under Cheap Pseudonyms, In: *Proceedings of the International IEEE Conference on E-Commerce Technology*, 2005
- [FeG01] Fehr, E. und Gächter, S.: *Do Incentive Contracts Crowd out Voluntary Cooperation?*, Arbeitspapier, 2001
- [FeG02] Fehr, E. und Gächter, S.: Altruistic punishment in humans, In: *Nature*, 2002, 415, 137-140
- [FeS99] Fehr, E. und Schmidt, K.: A Theory of Fairness, Competition, and Cooperation, In: *The Quarterly Journal of Economics*, 1999, 114 (3), 817-868
- [FeS02] Feigenbaum, J. und Shenker, S.: Distributed Algorithmic Mechanism Design: Recent Results and Future Directions, In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, 2002
- [FIP95] FIPS 180-1: *Secure Hash Standard*. U.S. Department of Commerce / NIST, National Technical Information Service, Springfield, 1995
- [FLS04] Feldman, M.; Lai, K.; Stoica, I. und Chuang, J.: Robust Incentive Techniques for Peer-to-Peer Networks, In: *Proceedings of the 5th ACM Conference on Electronic Commerce*, 2004, 102-111
- [FPC06] Feldman, M.; Papadimitriou, C.; Chuang, J. und Stoica, I.: Free-Riding and Whitewashing in Peer-to-Peer Systems, In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24 (5), 1010-1019
- [FrG06] Fraigniaud, P. und Gauron, P.: D2B: A de Bruijn based Content-Addressable Network, In: *Theoretical Computer Science*, 2006, 355 (1), 65-79
- [FrR01] Friedman, E. und Resnick, P.: The Social Cost of Cheap Pseudonyms, In: *Journal of Economics and Management Strategy*, 2001, 10 (2), 173-199
- [FuT91] Fudenberg, D. und Tirole, J.: *Game Theory*, MIT Press, 1991
- [GAA05] Gupta, M; Ammar, M und Ahamad, M.: Trade-offs between Reliability and Overheads in Peer-to-Peer Reputation Tracking, In: *Computer Networks*, 2005, 50 (4), 501-522
- [GCX05] Guo, L.; Chen, S.; Xiao, Z.; Tan, E.; Ding, X. und Zhang, X.: Measurements, Analysis, and Modeling of BitTorrent-like Systems, In: *Internet Measurement Conference*, 2005
- [GFJ03] Ge, Z.; Figueiredo, D.; Jaiswal, S.; Kurose, J. und Towsley, D.: Modeling Peer-to-Peer File Sharing Systems, In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications*, 2003

- [GGG03] Gummadi, K.; Gummadi, R.; Gribble, S.; Ratnasamy, S.; Shenker, S. und Stoica, I.: The Impact of DHT Routing Geometry on Resilience and Proximity, In: *Proceedings of the ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, 2003
- [GJA02] Gupta, M.; Judge, P. und Ammar, M.: A Reputation System for Peer-to-Peer Networks, In: *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 2429
- [GKK04] Gerdes, I.; Klawonn, F. und Kruse, R.: Evolutionäre Algorithmen (Computational Intelligence), Vieweg, 2004.
- [GLM01] Golle, P.; Leyton-Brown, K. und Mironov, I.: Incentives for Sharing in Peer-to-Peer Networks, In: *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Electronic Commerce*, 2001, 264-267
- [GrL05] Greiner, B. und Levati, V.: Indirect Reciprocity in Cyclical Networks – An Experimental Study, In: *Journal of Economic Psychology*, 2005, 26 (5), 711-731
- [Gro07] Grossklags, J.: Experimental Economics and Experimental Computer Science: A Survey, In: *Proceedings of the Workshop on Experimental Computer Science*, 2007
- [GSK03] Garcia-Molina, H.; Schlosser, M. und Kamvar, S.: The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks, In: *Proceedings of the 12th International World Wide Web Conference*, 2003
- [HaH97] Hauben, M. und Hauben, R.: *Netizens: On the History and Impact of Usenet and the Internet*, Wiley-IEEE Computer Society Press, 1997
- [HaH06] Hagen, E. und Hammerstein, P.: Game Theory and Human Evolution: A Critique of Some Recent Interpretations of Experimental Games, In: *Theoretical Population Biology*, 2006, 69, 339-348
- [HaL06] Han, J. und Liu, Y.: Dubious Feedback: Fair or Not?, In: *Proceedings of the International Conference on Scalable Information Systems*, 2006
- [Har68] Hardin, G.: The Tragedy of the Commons, In: *Science*, 1968, 162
- [HBK07] Hartmann, B.; Böhm, K.; Khachatryan, A. und Schosser, S.: The Dangers of Poorly Connected Peers in Structured P2P Networks and a Solution Based on Incentives, In: *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence*, 2007.
- [HeV02] Hens, T. und Vogt, B.: *Money and Reciprocity*. Arbeitspapier 138, Institute of Empirical Economics, Universität Zürich, 2002
- [HMS98] Hoffman, E.; McCabe, K. A. und Smith, V. L.: Behavioral foundations of reciprocity: Experimental economics and evolutionary psychology, In: *Economic Inquiry*, 36, 1998, 335-352
- [HoS03] Hofbauer, J. and Sigmund, K.: Evolutionary Game Dynamics, In: *American Mathematical Society*, 40 (4), , 2003, 479-519



- [JIB06] Jøsang, A.; Ismail, R. und Boyd, C.: A Survey of Trust and Reputation Systems for Online Service Provision, In: *Decision Support Systems*, 2006
- [Jol02] Jøsang, A. und Ismail, R.: The Beta Reputation System. In *Proceedings of the Bled Electronic Commerce Conference*, 2002
- [JuF03a] Jurca, R. und Faltings, B.: An Incentive Compatible Reputation Mechanism, In: *Proceedings of the IEEE International Conference on E-Commerce*, 2003, 285-292
- [JuF03b] Jurca, R. und Faltings, B.: Towards Incentive-Compatible Reputation Management, In: *Trust, Reputation and Security: Theories and Practice - Lecture Notes in AI*, 2003, 2631, 138-147
- [JuF04] Jurca, R. und Faltings, B.: "CONFESS". Eliciting Honest Feedback Without Independent Verification Authorities, In: *Proceedings of the Agent-Mediated Electronic Commerce*, 2004
- [KaK03] Kaashoek, F und Karger, D.: Koorde: A simple degree-optimal hash table, In: *International Peer-to-Peer Systems Workshop*, 2003
- [KeW00] Keser, C. und van Winden, F.: Conditional Cooperation and Voluntary Contributions to Public Goods, In: *Scandinavian Journal of Economics*, 2000
- [KGZ02] Kalogeraki, V.; Gunopulos, D. und Zeinalipour-Yazti, D.: A Local Search Mechanism for Peer-to-Peer Networks, In: *Proceedings of the International Conference on Information and Knowledge Management*, 2002
- [KiW89] Kiyotaki, N. und Wright, R.: On Money as a Medium of Exchange, In: *The Journal of Political Economy*, 1989, 97(4), 927-954
- [KrW82] Kreps, D. und Wilson, R.: Reputation and Imperfect Information, In: *Journal of Economic Theory*, 1982, 27, 253-279
- [KSG03a] Kamvar, S.; Schlosser, M. und Garcia-Molina, H.: The Eigentrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks, In: *Proceedings of the Twelfth International Conference on World Wide Web*, 2003, 640-651
- [KSG03b] Kamvar, S.; Schlosser, M. und Garcia-Molina, H.: Incentives for Combatting Freeriding on P2P Networks, In: *Proceedings of the International Euro-Par Conference*, 2003, 1273-1279
- [LKR03] Loguinov, D.; Kumar, A.; Rai, V. & Ganesh, S. Graph-theoretic analysis of structured peer-to-peer systems: routing distances and fault resilience *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, 2003
- [Mar94] Marsh, S.: *Formalising Trust as a Computational Concept*, Dissertation, University of Stirling, 1994

- [MaG04] Marti, S. und Garcia-Molina, H.: Limited Reputation Sharing in P2P systems, In: *Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce*, 2004
- [MHP01] Minar, N.; Hedlund, M. und Power, P.: Chapter 1: A Network of Peers, In: *Peer-to-Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies*, Oram, A. (Hrsg.), O'Reilly, 2001
- [MNR02] Malkhi, D.; Naor, M. und Ratajczak, D.: Viceroy: A Scalable and Dynamic Emulation of the Butterfly, In: *Proceedings of the Annual Symposium on Principles of Distributed Computing*, 2002, 183-192
- [Mor67] Morris, W.: On the Art of Modeling, In: *Management Science*, 1967, 13 (12), B707-B717
- [Nas50] Nash, J.: Equilibrium Points in n-person Games, In: *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 1950, 36, 48-49
- [NoS98] Nowak, M. und Sigmund, K.: Evolution of Indirect Reciprocity by Image Scoring, In: *Nature*, 1998, 393, 573-577
- [PaS05] Papaioannou, T. und Stamoulis, G.: An Incentives' Mechanism Promoting Truthful Feedback in Peer-to-Peer Systems, In: *Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Global P2P Computing*, 2005
- [PBM98] Page, L.; Brin, S.; Motwani, R. und Winograd, T.: *The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web*, Stanford Digital Library Technologies Project, 1998
- [PNB04] Piccolo, F.; Neglia, G. und Bianchi, G.: The Effect of Heterogeneous Link Capacities in BitTorrent-Like File Sharing Systems, In: *International Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems*, 2004
- [PRR97] Plaxton, C.; Rajaraman, R. und Richa, A.: Accessing Nearby Copies of Replicated Objects in a Distributed Environment, In: *ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures*, 1997, 311-320
- [PWC07] PricewaterhouseCoopers: *IAB Internet Advertising Revenue Report*, [http://www.iab.net/resources/adrevenue/pdf/IAB\\_PwC\\_2006\\_Final.pdf](http://www.iab.net/resources/adrevenue/pdf/IAB_PwC_2006_Final.pdf), 2007
- [RaL03] Ramasamy, L. und Liu, L.: Free Riding: A New Challenge to Peer-to-Peer File Sharing Systems, In: *Proceedings of the International Conference on System Sciences*, 2003
- [ReZ02] Resnick, P. und Zeckhauser, R.: Trust Among Strangers in Internet Transactions: Empirical Analysis of Ebay's Reputation System, In: *The Economics of the Internet and E-Commerce - Advances in Applied Microeconomics*, 2002, 11
- [RFH01] Ratnasamy, S.; Francis, P.; Handley, M.; Karp, R. und Shenker, S.: A Scalable Content-Addressable Network, In: *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications*, 2001, 161-172

- [RiM06] Risson, J. und Moors, T.: Survey of Research towards Robust Peer-to-Peer Networks: Search Methods, In: *Computer Networks*, 2006, 50, 3485-3521
- [RoD01] Rowstron, A. und Druschel, P.: Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems, In: *Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms*, 2001, 329-350
- [RRM03] Rosenthal, D.; Roussopoulos, M.; Maniatis, P. und Baker, M.: Economic Measures to Resist Attacks on a Peer-to-Peer Network, In: *Proceedings of the Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems*, 2003
- [RSS00] Rupert, P; Schindler, M.; Shevchenko, A. und Wright, R.: The Search-Theoretic Approach to Monetary Economics: A Primer, In: *Economic Review*, 2000, 10-28
- [RZF00] Resnick, P.; Zeckhauser, R.; Friedman, E. und Kuwabara, K.: Reputation Systems: Facilitating Trust in Internet Interactions, In: *Communications of the ACM*, 2000, 43(12), 45-48
- [SBS06a] Schosser, S.; Böhm, K.; Schmidt, R. und Vogt, B.: Incentives Engineering for Structured P2P Systems - a Feasibility Demonstration Using Economic Experiments, In: *Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce*, 2006
- [SBS06b] Schosser, S.; Böhm, K.; Schmidt, R. und Vogt, B.: Strategic Properties of Peer-to-Peer Data Structures and Behavior of Human Peers in Economic Experiments, In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering Workshops*, 2006
- [SBV07a] Schosser, S.; Böhm, K. und Vogt, B.: Indirect Partner Interaction in P2P Networks - Stimulating Cooperation by Means of Structure, In: *Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce*, 2007
- [SBV07b] Schosser, S.; Böhm, K. und Vogt, B.: Competition and Cooperation in Heterogeneous Structured P2P Systems – Are They Mutually Exclusive?, Technischer Bericht, Universität Karlsruhe, 2007
- [SBV08] Schosser, S.; Böhm, K. und Vogt, B.: Do Humans Identify Efficient Strategies in Structured Peer-to-Peer Systems? (Short Paper), In: *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2008
- [ScK02] Schlosser, M. und Kamvar, S.: Simulating a P2P File-Sharing Network, In: *Proceedings of the First Workshop on Semantics in P2P and Grid Computing*, 2002
- [SeS01] Seinen, I. und Schram, A.: *Social Status and Group Norms: Indirect Reciprocity in a Helping Experiment*, Arbeitspapier, Universität Amsterdam, 2001
- [Sel65] Selten, R.: Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrage-trägheit, In: *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft*, 1965, 12, 301-324

- [Sel67] Selten, R.: Die Strategiemethode zur Erforschung des eingeschränkt rationalen Verhaltens im Rahmen eine Oligopolexperiments, In: *Beiträge zur experimentellen Wirtschaftsforschung*. Heinz Sauer mann (Hrsg.), 1967, 136-168
- [Sel73] Selten, R.: A Simple Model of Imperfect Competition Where Four are Few and Six are Many, In: *International Journal of Game Theory*, 1973, 141-201
- [SeS86] Selten, R. und Stöcker, R.: End Behavior in Sequences of Finite Prisoner's Dilemma Supergames. In: *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1986, 7 (1), 47-70.
- [SGG02] Saroiu, S.; Gummadi, P. und Gribble, S.: A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems, In: *Proceedings of Multimedia Computing and Networking*, 2002
- [ShP03] Shneidman, J. und Parkes, D.: Rationality and Self-Interest in Peer to Peer Networks, In: *Proceedings of the International Workshop on Peer-to-Peer Systems*, 2003
- [Smi82] Smith, V.: Microeconomic Systems as an Experimental Science, In: *The American Economic Review*, 1982, 72 (5), 923-955
- [Smi94] Smith, V. L. Economics in the Laboratory, In: *The Journal of Economic Perspectives*, 1994, 8 (1), 113-131
- [SMU97] Selten, R., Mitzkewitz, M. und Uhlich, G.: Duopoly Strategies Programmed by Experienced Players, In: *Econometrica*, 1997, 65, 517-555.
- [SMK03] Stoica, I.; Morris, R.; Karger, D.; Kaashoek, M. und Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Protocol for Internet Applications, In: *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11, 17-32
- [StW05] Steinmetz, R. und Wehrle K.: *Peer-to-Peer Systems and Applications*, Springer, 2005
- [SXL05] Srivatsa, M.; Xiong, L. und Liu, L.: TrustGuard: countering vulnerabilities in reputation management for decentralized overlay networks. In: *Proceedings of the International Conference on World Wide Web*, 2005, 422-431
- [Tri71] Trivers R.: The Evolution of Reciprocal Altruism, In: *Quarterly Review of Biology* 1971, 46, 35-57
- [Var01] Varian, H.: *Grundzüge der Mikroökonomik*, 5. Auflage, Oldenburg, 2001
- [VCS03] Vishnumurthy, V.; Chandrakumar, S. und Sirer, E.: Karma: A Secure Economic Framework for Peer-to-Peer Resource Sharing, In: *Proceedings of the Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems*, 2003
- [XiL04] Xiong, L. und Liu, L.: PeerTrust: Supporting Reputation-Based Trust for Peer-to-Peer Electronic Communities. In: *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE)*. 2004, 16, 843 - 857

- [YaG03] Yang, B. und Garcia-Molina, H.: PPay: Micropayments for Peer-to-Peer Systems, In: *Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communication Security*, 2003
- [YuS00] Yu, B. und Singh, M.: A Social Mechanism of Reputation Management in Electronic Communities, In: *Proceedings of the International Workshop on Cooperative Information Agents*, 2000, 154-165
- [YuS03] Yu, B. und Singh, M. P.: Incentive Mechanisms for Peer-to-Peer Systems, In: *Proceedings of the International Workshop on Agents and Peer-to-Peer Computing*, 2003
- [ZgA07] Zghaibeh, M. und Anagnostakis, K.: On the Impact of P2P Incentive Mechanisms on User Behavior, In: *Proceedings of the Joint Workshop on The Economics of Networked Systems and Incentive-Based Computing*, 2007
- [ZKJ01] Zhao, B.; Kubiawicz, J. und Joseph, A.: *Tapestry: An Infrastructure for Fault-tolerant Wide-area Location and Routing* Technischer Bericht, 2001



## Publikationsliste

### Konferenzen

Stephan Schosser, Klemens Böhm und Bodo Vogt: „*Do Humans Identify Efficient Strategies in Structured Peer-to-Peer Systems? (Short Paper)*“, International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 12. – 16. Mai, Estoril, 2008.

Stephan Schosser, Klemens Böhm und Bodo Vogt: „*Indirect Partner Interaction in P2P Networks - Stimulating Cooperation by Means of Structure*“, ACM Conference on Electronic Commerce, 11. – 15. Juni, San Diego, 2007.

Stephan Schosser, Klemens Böhm, Rainer Schmidt und Bodo Vogt: „*Incentives Engineering for Structured P2P Systems - a Feasibility Demonstration Using Economic Experiments*“, ACM Conference on Electronic Commerce, 11. – 15. Juni, Ann Arbor, 2006.

### Workshops

Stephan Schosser, Klemens Böhm, Rainer Schmidt und Bodo Vogt: „*Strategic Properties of Peer-to-Peer Data Structures and Behavior of Human Peers in Economic Experiments*“, International Conference on Data Engineering Workshops, 3. – 7. April, Atlanta, 2006.

### Technische Berichte

Schosser, S.; Böhm, K. und Vogt, B.: Competition and Cooperation in Heterogeneous Structured P2P Systems – Are They Mutually Exclusive?, Technischer Bericht, Universität Karlsruhe, 2007.

### Koautorenschaften

Björn-Oliver Hartmann, Klemens Böhm, Andranik Khachatryan und Stephan Schosser: „*The Dangers of Poorly Connected Peers in Structured P2P Networks and a Solution Based on Incentives*“, IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence, 2. – 5. November, Silicon Valley, 2007.

Björn-Oliver Hartmann, Klemens Böhm, Andranik Khachatryan und Stephan Schosser: „*The Dangers of Poorly Connected Peers in Structured P2P Networks and a Solution Based on Incentives*“, Technischer Bericht, Universität Karlsruhe, 2007.

Holger Steinhaus, Klemens Böhm und Stephan Schosser: „*Anreizmechanismen für Peer-to-Peer Web Crawling unter Berücksichtigung bössartiger Teilnehmer*“, GI-Fachtagung für Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web, 5. – 9. März, Aachen, 2007.

Andreas Walter, Klemens Böhm und Stephan Schosser: „*Building Data-Intensive Grid Applications with Globus Toolkit – an Evaluation Based on Web Crawling*“, International Conference on Service Oriented Computing, 17. – 20. September, Wien, 2007.

Andreas Walter, Klemens Böhm und Stephan Schosser: „*Überlegungen zur Entwicklung komplexer Grid-Anwendungen mit Globus Toolkit*“, GI-Fachtagung für Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web, 5. – 9. März, Aachen, 2007.

Hagen Höpfner, Stephan Schosser und Kai-Uwe Sattler: „*An Indexing Scheme for Update Notification in Large Mobile Information Systems*“, International EDBT-Workshop on Pervasive Information Management, 18. März, Heraklion - Kreta, 2004.



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der Universität Karlsruhe (TH) in der Fassung vom 21. Dezember 2001 beachtet habe.

Stephan Schosser