Seminar über Algorithmen 21.01.2014

Anreize und versteckte Aktionen in Peer-to-Peer Systemen

Marcel Ehrhardt *Wolfgang Mulzer, Yannik Stein*

1 Einführung

Peer-to-Peer (p2p) Systeme sind ein interessantes Thema für die Forschung, da sie in der "wirklichen Welt" auftreten und somit können Forschungsergebnisse unmittelbar auf großen Mengen von echten Benutzern getestet und validiert werden. So wurde in 2000 in einer Studie über ***Gnutella*** gezeigt, dass fast 70% der Benutzer keine Dateien teilten und fast 50% der Rückmeldungen auf Anfragen von den Top 1% der teilenden Nutzer kam. Dies zeigte, dass ***Free-Rider*** (Benutzer die nur konsumieren, aber nicht teilen) ein Problem in solchen Systemen sind, und eröffnete Studien, wie dieses Problem durch Anreize (incentives) unterbunden werden können. Es entstanden neue Protokolle, wie z.B. BitTorrent, KazaA, Mojonation (heute: MNet), die Techniken, welche Anreize über ***Tauschhandel*** (Barter), ***Währung*** (Currency) oder dem ***Ruf*** (Reputation), verwendeten.

1.1 Das File-Sharing Spiel

Benutzer eines p2p Netzwerkes werden Peers genannt. In diesem p2p-Netzwerk spielt jeder Benutzer zwei Rollen: Zu manchen Zeitpunkten ist er Client, welcher etwas herunterladen möchte und damit einen Vorteil aus dem System zieht. In anderen Zeitpunkten ist er Server, der Dateien oder Teile davon zum Herunterladen anbietet und damit Kosten erfährt, wie z.B. Bandbreite, Prozessorleistung oder andere Kosten. Ein ***Contributor*** ist ein Peer, der in der Rolle des Servers auch seine Dateien teilt. Wohingegen ein ***Free- Rider*** ein Peer ist, der in der Rolle des Server seine Dateien nicht teilt.

Damit ist die Free-Rider-Entscheidung für Peers eine naheliegende, dominante Strategie. Dieses Spiel ähnelt dem ***Prisoner's Dilemma***, wo auch die dominante Strategie ist, zu boykottieren.

1.2 Besondere Herausforderungen in p2p Systemen

Peer-to-Peer Systeme sind meistens riesige Netzwerke mit mehreren Millionen Nutzern, sind hochdynamisch (***high turnover***) und haben meistens nur einmalige Verbindungen zu den gleichen Peers. Es gibt keine zentralen Einrichtungen, die für den ordnungsgemäßen Ablauf des Protokolls zuständig sind. Es gibt sogenannt ***Hidden-Actions***, wo das Verhalten von Peers teilweise nicht nachvollziehbar sind. Es kann sein, dass ein Peer nicht mitbekommen kann, dass ihm etwas angeboten hätte werden müssen. Dies liegt unter anderem an dem Ansatz ***best-effort*** im Internet. Es gibt kostenfreie Pseudonyme, wodurch das System relativ anonym bleibt. Durch günstige Pseudonyme kann man Einsteiger nicht von alten Nutzern, die aus dem System Ein- und Aussteigen unterscheiden (***White Washer*** Problem). Und man kann mehrere Identitäten im System haben (***Sybil*** Problem). Es gibt ein sogenanntes ***Asymmetry of Interest***. Wenn A von B etwas haben will, muss B nicht etwas von A haben wollen. Das Problem von Absprachen (***Collusion***) kann auftreten, wenn es eine geteilte Chronik über Free-Rider gibt.

Auf Grund dieser vielen neuen Probleme sind klassische Ansätze, wie z.B. ***Tit-for-Tat***, in p2p System nicht geeignet.

2 Anreize in Ruf-Systemen

Der Ruf ist ein funktionierendes Instrument, welches z.B. in Handelssystemen wie eBay verwendet werden und ist darum auch ein Ansatz für p2p Systeme. Contributer haben einen guten Ruf und bekommen deswegen besseren Service als Free-Rider. Ein Ruf- System ist meistens mit einem ***Service Differentiation*** Schema gekoppelt. So z.B. bekommt man in KaZaA Punkte für jede geteilte Datei und genießt eine höhere Wahrscheinlichkeit etwas herunterladen zu dürfen, wenn man eine gute Gesamtpunktzahl hat.

Adam Furmanczuk wird in seinem Vortrag "Reputation Systems" am 04.02.2014 konkreter auf dieses Thema außerhalb der p2p Welt eingehen. Wir werden uns ein minimales p2p Modell ansehen, welches ein Ruf-System mit Service Differentiation verwendet, um Anreize zur Kooperation zu schaffen.

2.1 Minimalistisches p2p Modell

In diesem Model gibt es rationale Peers i, die alle eine andere Einstellung bzgl. der Großzügigkeit zu dem System haben. Dieser Wert wird als Θ_i bezeichnet. Der Prozentanteil von Contributor im System wird als x bezeichnet (z.B. $x = 10\%$ Contributor und $1 - x = 90\%$ Free-Rider). Da bei einem großen Anteil x von Contributor die Kosten für alle Contributor weniger werden, werden die ***contribution cost***'s in Abhängigkeit von x als $\frac{1}{x}$ gesetzt.

Damit entscheidet sich, ob ein Peer

Contributor ist, falls $\Theta_i > \frac{1}{x}$,

Free-Rider ist, andernfalls.

Dies wird rundenbasiert ausgeführt, d.h. wenn in einer Runde mehr Contributor dazukommen, dann verringern sich die Kosten und in der nächsten Runde könnten mehr Peers Contributor werden. Und falls in einer Runde es weniger Contributor gibt, dann steigen die Kosten und damit sinkt der Anteil der Contributor. Damit ist klar, dass das System entweder kollabiert oder sich stabilisiert.

2.2 Free Market

Als erstes wird der ***Free Market*** betrachtet, in dem es keine Regulierungen oder Anreize gibt. Es wird angenommen, dass es eine Maximale Großzügigkeit Θ_m gibt und das die Großzügigkeit jedes einzelnen Peers i zufällig, gleichverteilt aus dem Intervall $[0, \Theta_m]$ ausgewählt wird. Der Anteil der Contributors (***contribution level***) ist auf Grund der Gleichverteilungsannahme von Θ_i

$$x' = \Pr[\Theta_i \geq 1/x] = \frac{\Theta_m - \frac{1}{x}}{\Theta_m} = 1 - \frac{1}{x\Theta_m} \quad .$$

Damit gibt $\Pr[\Theta_i \geq 1/x]$ an, wie viel Prozent x' der Peers Contributor in der nächsten Runde sind. Unter der Annahme der Verteilung von Θ_i und dem jetzigen Anteil von Contributors. Der exakte Anteil, wann ein System kollabiert oder sich stabilisiert, kann durch die Lösung der Fixpunktgleichung erhalten werden

$$
\begin{aligned}
x = \ & \Pr[\Theta_i \geq 1/x] = 1 - \frac{1}{x\Theta_m} \\
\Leftrightarrow \quad & 0 = \Theta_m x^2 - \Theta_m x + 1 \\
\Leftrightarrow \quad & x_{1/2} = \frac{\Theta_m \pm \sqrt{\Theta_m^2 - 4\Theta_m}}{2\Theta_m}
\end{aligned} \tag{1}
$$

Man beachte, dass erst ab $\Theta_m \geq 4$ sich das System überhaupt stabilisieren kann und x_1 den Anteil an Contributor beschreibt, wo das System stabil ist, wohingegen x_2 den Anteil angibt, wo das System kollabiert. Des Weiteren ist klar, dass $x_1 = 1$, wenn $\Theta_m \to \infty$.

Satz 1. *Das stabile Gleichgewicht des contribution level x_1 steigt in Θ_m und konvergiert in $x_1 = 1$, wenn $\Theta_m \to \infty$, aber ist $x_1 = 0$, falls $\Theta_m < 4$.*

2.3 Ruf gekoppelt mit Service Differentiation

Nun wird das System betrachtet, wenn Anreize mittels Service Differentiation über ein Rufsystem geschaffen werden. Es wird angenommen, dass es ein Rufsystem mit $p \in [0, 1]$ gibt, welches Free-Rider und Contributor perfekt erkennen kann und Free-Rider nur das $(1-p)$-Fache an Leistung gegenüber eines Contributor bekommt.

Der Gewinn Q für jeden Peer ist αx, da wenn mehr Peers teilen, jeder einzelne Peer mehr vom System hat, wobei $\alpha \geq 1$ eine beliebige Konstante ist. Des Weiteren gibt es für Free-Rider die Gefahr $T = p\alpha x$, da der Gewinn für Free-Rider um den Anteil p reduziert wird. Außerdem gibt es für die Contributor reduzierte contribution costs R, da Free-Rider nur eine verringerte Leistung von den Contributor bekommen. Somit ist $R = \frac{x+(1-x)(1-p)}{x}$, wobei der Zähler die reduzierte Last vom System ist.

Definition 2 (Leistung)**.** *Die Leistung einer Gruppierung (z.B. aller Peers, nur der Contributor, oder nur der Free-Rider) ist die Differenz des Gewinns und der Kosten im Durchschnitt pro Peer der Gruppierung.*

Damit beträgt die Leistung der Contributor $W_c = Q - R = \alpha x - \frac{x+(1-x)(1-p)}{x}$, sowie die Leistung der Free-Rider $W_f = Q - T = \alpha x - p\alpha x = (1-p)\alpha x$, also ist der Gewinn eines Free-Riders, wie eingangs gefordert, um $(1-p)$ reduziert worden. Die Leistung aller Peers beträgt $W_s = xW_c + (1-x)W_f = (\alpha x - 1)(x + (1-x)(1-p))$.

Es stellt sich wieder die Frage, ab wann das System stabil bleibt. Dazu wird $R-T$ als contribution cost angenommen, da durch den reduzierten Gewinn für jeden Free-Rider, bis zu der Schwelle T mehr Gewinn erzielt werden kann, wenn dieser ein Contributor ist. Um die Frage der Stabilität zu beantworten, muss die Gleichung $x = \Pr[\Theta_i \geq R - T]$ gelöst werden.

$$
\begin{aligned}
x = \ & \Pr[\Theta_i \geq R - T] = \frac{\Theta_m - (R-T)}{\Theta_m} = 1 - (R-T)\frac{1}{\Theta_m} \\
\Leftrightarrow \quad & x_{1/2} = \frac{\Theta_m - p \pm \sqrt{p^2 + 2p\Theta_m + \Theta_m^2 - 4\Theta_m + 4\alpha p - 4\alpha p^2}}{2(\Theta_m - \alpha p)}
\end{aligned} \tag{2}
$$

Satz 3. *Mit diesem Bestrafungsmechanismus existiert ein Gleichgewicht mit $x = 1$, falls $p \geq \frac{1}{\alpha}$ ist.*

Beweis.

Die Frage ist, wann $1 \leq \Pr[\Theta_i \geq R - T] = 1 - \frac{\frac{x + (1-x)(1-p)}{x} - p\alpha x}{\Theta_m}$ gilt. Angenommen $x = 1$, dann ist

$$0 \leq -\frac{1}{\Theta_m} + \frac{p\alpha}{\Theta_m} \Leftrightarrow 1 \leq p\alpha \Leftrightarrow p \geq \frac{1}{\alpha} \tag{3}$$

□

Um von einem contribution level $x \in [1 - \epsilon, 1]$ das Gleichgewicht $x = 1$ erreichen zu können, muss Θ_m größer sein als

$$\Theta_m^{threshold} = \frac{1 - 2\alpha + \epsilon\alpha}{\alpha(\epsilon - 1)} \quad .$$

Noch ein Paar abschließende Beobachtungen. Im Gleichgewicht ist die Systemleistung $W_s = \alpha - 1$, welche optimal ist. Außerdem reichen bei großen α's nur eine kleine Leistungsbestrafung gegenüber den Free- Ridern, damit das System für jedes $\Theta_m \geq \Theta_m^{threshold}$ die beste Leistung erzielt (alle sind Contributor).

3 Hidden Actions in p2p Systemen

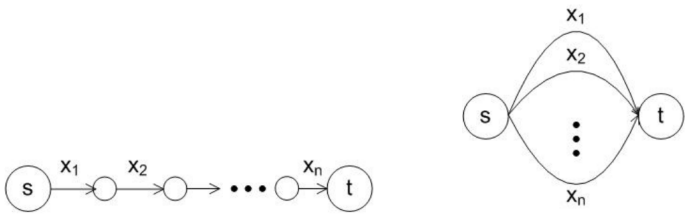
Wie in der Einleitung beschrieben, kann es sein, dass ein Peer nicht mitbekommt, dass ein anderer Peer für ihn etwas hätte machen müssen.

Im Protokoll von Gnutella und KaZaA gibt es die Möglichkeit nach Dateien zu suchen, dazu wird eine Anfrage an alle Nachbarn gestellt, die wiederum von ihren Nachbarn weitergetragen werden sollen. Wenn ein Peer die gewünschte Datei hat, dann soll eine Verbindung aufgebaut werden. Dieses fluten ist für alle Peers kostspielig und bringt nur dem fragenden Peer etwas. Wodurch es sein könnte, dass rationale Peers gar nicht oder nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit sich beteiligen. Klar ist, dass das System nicht funktioniert, wenn jeder das System boykottiert. Diese Vorgehensweise wird z.B. von Internetdienstanbieter angewandt, um Kosten zu sparen (Hot Potato Routing).

3.1 Das Hidden-Action Principal-Agent Modell

Im ***Hidden-Action Principal-Agent Modell*** (Auftraggeber-Agenten) wird angenommen, dass es einen Auftraggeber gibt, der ein Projekt zum Erfolg führen will und dazu Agenten anstellt. Das besondere ist, dass der Auftraggeber nur das Endergebnis sieht und nicht weiß, wer etwas zum Erfolg oder Misserfolg beigetragen hat.

Der Auftraggeber hat eine Wertvorstellung v (valuation) für das Projekt und kann n Agenten aus N anstellen und in jedem Vertrag dieser Agenten $i \in N$ einen Preis festlegen, wobei $p_i \geq 0$, falls das Projekt gelingt und nichts, falls es misslingt. Dies wird als ***Haftungsbeschränkung*** (Limited liability) bezeichnet. Jeder Agent hat zwei Möglichkeiten $a_i \in A_i = \{0, 1\}$ zur Beteiligung am Projekt (***Binary- Action***). Entweder beteiligt er sich am Projekt ($a_i = 1$) oder beteiligt sich nicht ($a_i = 0$). Es wird angenommen, dass alle beteiligenden Agenten die gleichen Kosten $c \geq 0$ haben, wohingegen nicht beteiligende keine Kosten haben. Der Ausgang des Projekt $o \in \{0, 1\}$ kann nur entweder Erfolg oder Misserfolg sein (***Binary- Outcome***).



(a) AND-Netzwerk (b) OR-Netzwerk

Abbildung 1: Zwei einfache Read-once Netzwerke mit einer Quelle s und einer Senke t

Es wird angenommen, dass eine Funktion $t : A_1 \times \ldots \times A_n \to [0, 1]$ die Erfolgswahrscheinlichkeit $t(a)$ des Projekts ausgibt, wenn $a = (a_1, \ldots, a_n) \in A_1 \times \ldots \times A_n = A$ die Aktionen der Agenten sind. Sei $a_{-i} \in A_{-i}$ definiert als $a_{-i} = (a_1, \ldots, a_{i-1}, a_{i+1}, \ldots, a_n)$ (Vektor a ohne a_i). Es wird gefordert, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit immer höher ist, wenn jemand sich beteiligt, d.h.

$$\forall i \in N, \forall a_{-i} \in A_{-i} \quad t(1, a_{-i}) > t(0, a_{-i})$$

und das $t(a) > 0$ für alle $a \in A$.

Wir betrachten als t nur noch sogenannte strukturierte Funktionen, wo jeder Agent unabhängig voneinander in seiner Unteraufgabe erfolgreich ist oder nicht. Diese Funktionen werden durch monotone, boolesche Funktionen $f : \{0, 1\}^n \to \{0, 1\}$ dargestellt und das Projekt ist erfolgreich, wenn es eine Belegung $x = (x_1, \ldots, x_n)$, d.h. Agenten ihre Unteraufgaben erfolgreich lösen oder nicht, mit $f(x) = 1$ gibt. $t(a_1, \ldots, a_n)$ wird dann als Wahrscheinlichkeit von $f(x_1, \ldots, x_n) = 1$ definiert, unter der folgenden Verteilung von $x = (x_1, \ldots, x_n)$:

$$x_i = \begin{cases} 1 \text{ mit Wahrscheinlichkeit } 1 - \gamma, \text{ falls } a_i = 1, \\ 0 \text{ mit Wahrscheinlichkeit } \gamma, \text{ falls } a_i = 1, \\ 1 \text{ mit Wahrscheinlichkeit } \gamma, \text{ falls } a_i = 0, \\ 0 \text{ mit Wahrscheinlichkeit } 1 - \gamma, \text{ falls } a_i = 0 \end{cases} , \qquad \gamma \in (0, \frac{1}{2})$$

Damit ist die Repräsentation der Funktion $t(a)$ auf die Repräsentation der booleschen Funktion reduziert worden. Eine Unterklasse von booleschen Funktionen, die als Graph dargestellt werden können, sind ***Read-once Netzwerke***.

Read-once Netzwerke sind Graphen in denen es zwei spezielle Knoten s, t gibt, wobei s eine Quelle und t eine Senke ist. In diesem Graphen kontrolliert jeder Agent i eine Kante. Diese Kante ist verfügbar, falls $x_i = 1$ unter der oben gegebenen Verteilung. Das Projekt ist also dann erfolgreich, wenn es eine Belegung x gibt, mit der ein Pfad von s nach t entsteht. In Abbildung 1 sind zwei einfache Read-once Netzwerke, nämlich ***AND***- und ***OR***-Netzwerke gegeben.

Definition 4. *Der relative Erfolgseinfluss von einem Agenten i auf das Projekt soll als Δ_i bezeichnet werden und ist definiert als*

$$\Delta_i(a_{-i}) = t(1, a_{-i}) - t(0, a_{-i})$$

Der Nutzen des Agenten i ist $u_i(a) = p_i \cdot t(a) - a_i c$, wobei angenommen wird, dass die Agenten ein Nash Gleichgewicht erreichen, falls es eines gibt. Die Aufgabe des Auftraggebers ist es, seinen erwarteten Gewinn $u(a, v) = t(a)(v - \sum_i p_i)$ zu maximieren, wobei die Agenten a in einem Nash Gleichgewicht sind.

Satz 5. *Seien a_{-i} die Aktionen der anderen Agenten, dann ist die beste Strategie des Agenten i, $a_i = 1$, falls $p_i \geq \frac{c}{\Delta_i(a_{-i})}$ und $a_i = 0$, falls $p_i \leq \frac{c}{\Delta_i(a_{-i})}$. (Im Fall der Gleichheit unterscheiden sich beide Strategien nicht)*

Beweis. Die Frage ist: Wann ist der Nutzen für einen beteiligenden Agenten i größer.

$$\begin{aligned} & u_i(1, a_{-i}) \geq u_i(0, a_{-i}) \\ \Leftrightarrow \quad & p_i \cdot t(1, a_{-i}) - c \geq p_i \cdot t(0, a_{-i}) \\ \Leftrightarrow \quad & p_i \cdot t(1, a_{-i}) - p_i \cdot t(0, a_{-i}) \geq c \\ \Leftrightarrow \quad & p_i \cdot \Delta_i(a_{-i}) \geq c \\ \Leftrightarrow \quad & p_i \geq \frac{c}{\Delta_i(a_{-i})} \end{aligned} \tag{4}$$

□

Folgerung 6. *Die besten Verträge für den Auftraggeber, welche für $a \in A$ ein Gleichgewicht erzeugen, sind diejenigen, wo $p_i = 0$ für Agenten, die sich nicht beteiligen ($a_i = 0$) und $p_i = \frac{c}{\Delta_i(a_{-i})}$ für Agenten, die sich beteiligen.*

Der Auftraggeber sucht nun für seine Wertvorstellung v die optimalen Aktionen der Agenten $a^* \in A$, welche den größten erwarteten Gewinn $u(a^*, v)$ im Gleichgewicht liefern. Den Wert $a \in A$ zu wählen, korrespondiert damit Agenten $S \subseteq N$ zu wählen, welche sich am Projekt beteiligen. Sei $t(S) := t(a)$ mit $a \in A$, wenn $S = \{i \mid a_i = 1\}$. Bezeichne die Agenten $S^*(v)$, die zu den optimalen Aktionen $a^* \in A$ mit der Wertvorstellung v korrespondieren, als ***optimalen Vertrag***.

Um den optimalen Vertrag im Hidden-Action Modell mit dem optimalen Vertrag im Observable-Action-Modell, wo die Aktionen der Agenten sichtbar sind, vergleichen zu können, wird das Verhältnis vom ***social welfare*** in diesen beiden Modellen genommen. Sei $S^*_{oa}(v)$ der optimale Vertrag für die Wertvorstellung v vom Auftraggeber im Observable-Action-Modell. Der social welfare im Hidden-Action-Modell ist

$$\text{welfare}(a, v) = u(a, v) + \sum_{i \in N} u_i(a) = v \cdot t(a) - \sum_{i \in N, a_i = 1} c$$

und im Observable-Action-Modell

$$\text{welfare}_{oa}(a, v) = u_{oa}(a, v) + \sum_{i \in N} u^{oa}_i(a) = v \cdot t(a) - \sum_{i \in N, a_i = 1} c \quad ,$$

wobei $u^{oa}_i(a) = p_i - c = 0$, da jeder Agent genau zu seinen Kosten angestellt werden kann.

Definition 7 (Price of Unaccountability (POU))**.** *Der Price of Unaccountability $POU(t)$ der Funktion t ist*

$$POU(t) = Sup_{v>0} \ \frac{\text{welfare}_{oa}(S^*_{oa}(v), v)}{\text{welfare}(S^*(v), v)}$$

Das folgende Lemma gilt für das Hidden-Action-und Observable-Action-Modell.

Lemma 8 (Monotonicity lemma)**.** *Für jedes t ist sowohl der erwartete Nutzen für den Auftraggeber unter den optimalen Verträgen, als auch die Erfolgswahrscheinlichkeit, sowie die erwartete Bezahlung der Agenten, monoton steigend im Wert v.*

Abschließend noch ein paar interessante Ergebnisse.

Satz 9. *Für jedes AND-Netzwerk (= t) mit n Agenten und einem $\gamma \in (0, \frac{1}{2})$ gilt:*

- *Es existiert ein Wert $v^* < \infty$, so dass für jedes $v < v^*$ ist optimal mit keinem Agenten einen Kontakt abzuschließen und für $v > v^*$ ist es optimal einen Kontakt mit allen Agenten abzuschließen. Im Wert $v = v^*$ ist beides gleich optimal.*
- *$POU(t) = (\frac{1}{\gamma} - 1)^{n-1} + (1 + \frac{\gamma}{1-\gamma})$ und diesen Wert erhält man im Übergangspunkt des Hidden-Action-Modell.*

Der *POU* Wert ist nicht beschränkt, da $POU \to \infty$, wenn entweder $\gamma \to 0$ bei jedem $n \geq 2$ oder $n \to \infty$ für jedes $\gamma \in (0, \frac{1}{2})$.

Satz 10. *Für jedes OR-Netzwerk (= t) mit n Agenten und einem $\gamma \in (0, \frac{1}{2})$ gilt:*

- *Es existieren endlich viele positive Werte $v_1 < \ldots < v_n$, so dass für jedes v, wo $v_k < v < v_{k+1}$ gilt, es optimal ist mit genau k Agenten einen Kontakt abzuschließen.*
- *$POU(t)$ ist beschränkt durch $\frac{5}{2}$.*

Also ist der Verlust, wenn die Handlungsweise der Agenten nicht sichtbar ist, höchstens um einen Faktor $\frac{5}{2}$ schlechter.

Satz 11. *Das Optimale-Vertrags-Problem für Read-Once Netzwerke ist #P-schwer.*

Literatur

[1] Moshe Babaioff, Michal Feldman, and Noam Nisan. Combinatorial agency. In *ACM Conference on Electronic Commerce*, pages 18–28, 2006.

[2] M. Feldman, C. Papadimitriou, J. Chuang, and I. Stoica. Free-riding and whitewashing in peer-to-peer systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 24(5):1010–1019, 2006.

[3] Michal Feldman and John Chuang. Overcoming free-riding behavior in peer-to-peer systems. *ACM Sigecom Exchanges*, 6:2005, 2005.

[4] Michal Feldman, Kevin Lai, Ion Stoica, and John Chuang. Robust incentive techniques for peer-to-peer networks. In *Proceedings of the 5th ACM Conference on Electronic Commerce*, EC '04, pages 102–111, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[5] Noam Nisan, Tim Roughgarden, Eva Tardos, and Vijay V. Vazirani. *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2007.