

Spieltheorie und ihre Anwendung im Mobilfunk

Markus Radimirsch, Klaus Jobmann

Universität Hannover, Institut für Allgemeine Nachrichtentechnik (IANT)
Appelstr. 9A, 30167 Hannover
{radimirsch|jobmann}@ant.uni-hannover.de

Abstract: Die Spieltheorie wurde ursprünglich zur Lösung von Problemstellungen aus der Ökonomie entwickelt, in denen Akteure gegensätzliche Interessen haben. Sie wurde in den letzten Jahren bereits zur Ressourcensteuerung und Dienstgüterebereitstellung im Internet verwendet und wird nun zunehmend auch im Mobilfunk eingesetzt. Die Veröffentlichung gibt einen kurzen Überblick über spieltheoretische Methoden und zeigt ihre Anwendung im Mobilfunk anhand von Beispielen.

1 Einführung

In der Ökonomie kommt es regelmäßig zu Situationen, in denen mehrere Akteure eine Entscheidung treffen, die einerseits den eigenen Nutzen maximieren soll, andererseits wird der Nutzen durch die Entscheidungen der anderen Akteure beeinflusst. Natürlich wollen alle Akteure ihren Nutzen maximieren, so dass ein Konflikt entsteht. Ein typisches Beispiel ist die Abhängigkeit des Preises von Angebot und Nachfrage, wobei das Angebot von der Gesamtheit der Akteure bestimmt wird. Nun soll jeder der Akteure seine Produktionsmenge so bestimmen, dass sein Nutzen maximal wird. Produziert ein Akteur zu viel, führt dies zu einem niedrigen Preis, der sowohl seinen eigenen als auch den Nutzen der anderen Akteure schmälert. Dieser Akteur hat dann einen Gewinn davon, dass er weniger produziert. Produziert ein Akteur zu wenig, kann möglicherweise ein anderer Akteur mehr produzieren und einen höheren Gewinn erzielen. Da die Akteure ihre Entscheidungen ohne gegenseitige Absprache, d.h. unkoordiniert treffen, ist das Ergebnis nicht unmittelbar klar und vorhersehbar.

Die Spieltheorie stellt Methoden zur Verfügung, die helfen, solche Situationen zu modellieren und Lösungen zu finden. Die Lösungen sind zunächst streng formal bestimmt und gehen von vollständig rationalem Handeln aller Spieler aus. Sie geben aber Hinweise auf die Dynamik des Vorgangs und damit wichtige Entscheidungshilfen. Die Spieltheorie wurde z.B. bei der Versteigerung der UMTS-Frequenzen verwendet.

Bei der Anwendung in der Kommunikationstechnik sind die Akteure technische Geräte, die streng algorithmisch und ohne persönliche Präferenzen funktionieren. Die Spieltheorie eignet sich im technischen Bereich zur Modellierung immer dann, wenn eine begrenzte Ressource verteilt werden soll, um die ein Konflikt entsteht. So wurde sie beispielsweise bei der verteilten Zuweisung von Übertragungskapazität im Internet und der Optimierung des Transport Control Protocol (TCP) verwendet, [LA02, LA00].

In Mobilfunksystemen ist die kritische begrenzte Ressource meist die Übertragungskapazität des Funkmediums. Durch die Rundstrahlcharakteristik der Funkausbreitung ist die Kommunikation nicht gezielt, sondern erreicht viele ungewollte

Empfänger. Moderne zellulare Mobilfunknetze verwenden eine Frequenz nach einer bestimmten Distanz wieder, wodurch freilich eine gegenseitige Beeinflussung der Zellen durch Interferenz entsteht, [Wa02]. Um die Interferenzen zu begrenzen (und um bei batteriebetriebenen Geräten Energie zu sparen), wird die Sendeleistung geregelt. Die Sendeleistungsregelung (Transmit Power Control, TPC) erfolgt dabei allgemein pro Funkzelle und wird nach formalen Kriterien optimiert, [Ya95].

In letzter Zeit haben sich Forscher mit der Optimierung der TPC mit Hilfe spieltheoretischer Methoden beschäftigt und erstaunliche Lösungen gefunden. Ein weiteres Beispiel für Spieltheorie in Funksystemen ist die Anwendung auf das Kanalzugriffsprotokoll Aloha, [MW01a].

In Kapitel 2 werden einige Grundlagen und Prinzipien der Spieltheorie eingeführt, gefolgt von einem Anwendungsbeispiel mit Leistungsregelung in Funksystemen in Kapitel 3. Der Aufsatz schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Grundbegriffe der Spieltheorie

Es werden hier nur einige grundlegende Begriffe und Mechanismen der Spieltheorie eingeführt. Eine kurze und prägnante Einführung findet sich in [MW01b], wo auch eine Übersicht über ihre Anwendung auf TPC beschrieben ist. Eine ausführliche Einführung gibt beispielsweise [HI96].

Ein Spiel $\Gamma = (\mathbf{N}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$ ist beschrieben durch:

1. Die Menge der Spieler $\mathbf{N} = \{1, \dots, n\}$.
2. Den Strategieraum \mathbf{S} , der sich aus der Menge aller möglichen Strategiekombinationen $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_n)$ aus den Strategien s_i , $1 \leq i \leq n$, der Spieler zusammensetzt. Die möglichen Strategien beschreiben im allgemeinen auch die Spielregeln.
3. Die Nutzenfunktion $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$. Dabei gibt $u_i(\mathbf{s})$ den Nutzen für Spieler i an, wenn die Strategiekombination \mathbf{s} gespielt wird.

Tabelle 1: Nutzenfunktion des Gefangenendilemmas

Spieler 1	Spieler 2	
	ng	g
ng	(-6,-6)	(-36,0)
g	(0,-36)	(-24,-24)

Ein einfaches Spiel ist das Gefangenendilemma. Dabei haben zwei Gefangene, d.h. $\mathbf{N} = (1, 2)$, jeweils die reinen Strategien *gestehen* (**g**) und *nicht gestehen* (**ng**), d.h. $\mathbf{S} = ((\mathbf{g}, \mathbf{g}), (\mathbf{ng}, \mathbf{g}), (\mathbf{g}, \mathbf{ng}), (\mathbf{ng}, \mathbf{ng}))$. Wenn keiner gesteht, erhalten sie jeweils eine Strafe von 6 Monaten. Gesteht nur einer, wird der Geständige sofort freigelassen, der andere erhält 3 Jahre Gefängnis. Wenn beide gestehen, gehen beide für 2 Jahre ins Gefängnis. Die sich ergebende Nutzenfunktion \mathbf{u} ist in Tabelle 1 als negativer Wert der Gefängnisstrafe in Monaten angegeben. Der erste Eintrag gilt jeweils für Spieler 1, der zweite Eintrag für Spieler 2.

Erstaunlicherweise besteht die Lösung in diesem Fall darin, dass beide Gefangene ein Geständnis ablegen, auch wenn sich beide durch *nicht gestehen* besser stellen würden. Angenommen, ein Spieler gesteht nicht. Dann hat der andere Spieler einen Vorteil, wenn

er gesteht. Erst mit der Strategiekombination (g,g) kann sich keiner der Spieler verbessern, ohne dass der andere sich verschlechtert. Die Strategiekombination (g,g) ist ein sogenanntes Nash-Gleichgewicht. Wenn wir s_{-i} als die Strategiekombination s ohne die Strategie des Spielers i bezeichnen, d.h. $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$, dann gilt:

Definition 1:

Ein Nash-Gleichgewicht ist eine Strategiekombination s^* , bei der jeder Spieler eine bei gegebenen Strategien der Mitspieler optimale Strategie wählt, d.h.

$$u_i(s_{-i}^*, s_i^*) \geq u_i(s_{-i}^*, s_i) \text{ für alle } i \text{ und } s_i \in S_i.$$

Das bedeutet, dass alle Spieler wechselseitig beste Strategien wählen. Es lässt sich zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen in jedem Spiel mindestens ein Nash-Gleichgewicht existiert, gegebenenfalls unter Verwendung gemischter Strategien (oft existieren auch mehrere Gleichgewichte). Man spricht von gemischten Strategien, wenn die Auswahl der gespielten Strategie aus den möglichen reinen Strategien nach einem Zufallsverfahren geschieht.

Das Gefangenendilemma wird einem Zug gespielt. Nehmen wir an, das Spiel wird immer wieder gespielt, wobei die Spieler das Ergebnis des vorherigen Spielzugs kennen, bevor sie einen neuen Spielzug machen. Man spricht dann von einem wiederholten Spiel. Wenn die Anzahl der Spielzüge endlich ist, mag zu Beginn jeder der Spieler kooperieren und ng spielen. Wenn einer der Spieler im Verlauf des Spieles g spielt, kann sich der andere durch g im nächsten Spielzug verbessern. Von da an werden beide Spieler in jedem Spielzug gestehen, da sie sich einseitig verschlechtern würden durch ng . Auf jeden Fall aber werden beide Spieler im letzten Spielzug gestehen, da nun im wesentlichen die gleiche Situation herrscht wie beim Ein-Zug-Spiel.

Ist die Anzahl der Spielzüge nicht endlich (oder das Ende nicht bekannt), kann es von Vorteil sein, nicht zu gestehen. Es gibt unendlich wiederholte Spiele, bei denen eine „Tit-for-Tat“ Strategie gespielt wird, d.h. alle spielen zunächst die kooperative Strategie. Wenn einer der Spieler abweicht, bestraft man ihn in der nächsten Periode mit nicht-kooperativem Verhalten. Wenn der Mitspieler wieder kooperiert, kehren die anderen zur kooperativen Spielweise zurück.

Schließlich führen wir den Begriff des Pareto-Optimums ein. Jedes Spiel hat ein soziales Optimum. Im Gefangenendilemma ist dies (ng, ng) . Das Pareto-Optimum ist häufig kein Nash-Gleichgewicht. In unendlich wiederholten Spielen kann jede „plausible“ Nutzenfunktion u erreicht werden, so dass das soziale Optimum ebenfalls erreicht werden kann. Bei entsprechend gestalteten Spielregeln kann somit eine sogenannte Pareto-Verbesserung gegenüber dem Ein-Zug-Spiel erreicht werden, gegebenenfalls sogar das Pareto-Optimum.

3 Leistungsregelung in Mobilfunksystemen

In der Literatur gibt es einige Veröffentlichungen zum Thema Leistungsregelung und Spieltheorie für Datendienste in Funknetzen für Datendienste. Die ersten Veröffentlichungen dazu sind 1998 erschienen, [Fa98, FMG99]. Die Aufsätze betrachten den Uplink einer einzelnen Zelle in einem CDMA-basierten System. Die richtige Nutzenfunktion ist in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung. In allen Aufsätzen

wird die gleiche Nutzenfunktion verwendet, die hier dargestellt werden soll. Anschließend wird das Leistungsregelungsspiel kurz beschrieben und die daraus resultierende Leistungsfähigkeit der Systeme angegeben.

Die Nutzenfunktion wird aus den Eigenschaften des Übertragungsverfahrens in Abhängigkeit von der Bitfehlerrate (BER) gewonnen. Die BER ist abhängig vom Signal-Störabstand (SIR) am Empfänger, d.h. der Basisstation, die gleichzeitig Signale verschiedener Teilnehmer, durch verschiedene Spreizcodes getrennt, empfängt. Teilnehmer j sende mit Leistung p_j und werde an der Basisstation mit dem SIR γ_j empfangen. Die Pakete haben eine konstante Größe von L bits und alle Nutzer verwenden die Datenrate R in bit/sekunde. Dann ist die Nutzenfunktion von Nutzer j :

$$u_j(p_j, \gamma_j) = \frac{R}{p_j} (1 - 2BER(\gamma_j))^L. \quad (1)$$

Der zweite Term nähert die Paketfehlerrate an, die BER wird jedoch mit 2 multipliziert, um zu vermeiden, dass u_j für $p_j \rightarrow 0$ gegen ∞ geht. Die Einheit von u_j ist bit/Joule, d.h. sie ist ein Maß dafür, wie viele Bits pro Energieeinheit korrekt empfangen werden können. Wenn als Modulationsart ein Frequenzumschaltverfahren (FSK) verwendet wird, ergibt sich u_j aus Gl. (1) zu

$$u_j(p_j, \gamma_j) = \frac{R}{p_j} (1 - e^{-0.5\gamma_j})^L, \text{ siehe [SMD99]}. \quad (2)$$

Ein Beispiel für eine Nutzerfunktion nach Glg. (2) unter der Annahme, dass der Störanteil der übrigen Nutzer konstant bleibt, ist in Abb. 1 gezeigt. Wenn die Sendeleistung zu gering ist, wird der SIR an der Basisstation zu gering, und es werden keine Daten korrekt empfangen. Wenn die Sendeleistung zu hoch wird, verschwendet der Teilnehmer Energie, ohne dass der Durchsatz steigt. Dazwischen liegt ein klares Maximum.

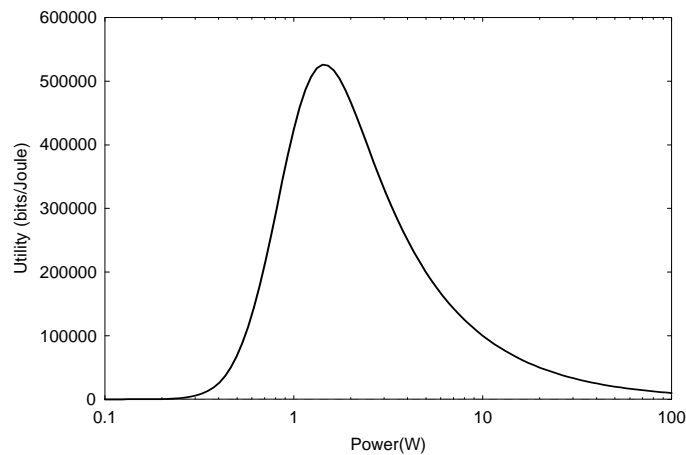


Abb. 1: Beispielhafte Nutzenfunktion nach Gleichung (2)

Es zeigt sich, dass das Spiel genau ein Nash-Gleichgewicht hat, das aber nicht Paretoeffizient ist. In [Fa98, SMD99] wird eine Preisfunktion eingeführt, mit der eine Pareto-Verbesserung erreicht wird, die allerdings nicht dem sozialen Optimum entspricht. In

[MW01c] schließlich wird gezeigt, dass das soziale Optimum in einem solchen Szenario mit Hilfe eines wiederholten Spiels erreicht werden kann.

In [MW01c] werden die Verfahren miteinander verglichen. So kann in einem gegebenen Szenario mit der Preisfunktion eine Verringerung der durchschnittlichen Sendeleistung um ca. 3 dB und mit dem wiederholten Spiel um ca. 15 dB erreicht werden. Der Nutzen in [bit/Joule] kann mit dem wiederholten Spiel um etwa einen Faktor 30 gesteigert werden, d.h. es können 30-Mal mehr Bits pro Energieeinheit übertragen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Jüngere Forschungsergebnisse zeigen, dass die Spieltheorie für die Lösung von Leistungsregelung in Funknetzen insbesondere für Datendienste ein geeignetes Mittel ist. Sie bietet einerseits Ansätze zur Entwicklung von Leistungsregelungsverfahren, andererseits das theoretische Rüstzeug zur analytischen Bestimmung ihrer Korrektheit und Leistungsfähigkeit.

In der derzeitigen Literatur finden sich lediglich Vorschläge für CDMA-basierte Netze und dort nur für den Uplink. Das IANT arbeitet derzeit an Verfahren zur kombinierten Sendeleistungsregelung und adaptiver Modulation in drahtlosen LAN-Systemen, in denen auch der Downlink betrachtet wird. Als Beispielsystem wird HIPERLAN/2 betrachtet. Erste Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Systemdurchsatz mit diesen Methoden um mehr als 15% gegenüber Systemen ohne TPC gesteigert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [LA02] La, R.J.; Anantharam, V.: Utility-Based Rate Control in the Internet for Elastic Traffic. IEEE Trans. Networking, Vol. 10, No. 2, April 2002
- [LA00] La, R.J.; Anantharam, V.: Charge-sensitive TCP and rate control in the Internet. Proc. INFOCOM 2000, Volume: 3, Tel Aviv, Israel, 2000
- [Wa02] Walke, B.: Mobile Radio Networks. 2nd edition, Wiley, 2002
- [Ya95] Yates, R.: A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems. IEEE J. Select. Areas of Comm. (JSAC), Vol. 13, Juli 1995
- [MW01a] MacKenzie, A.B.; Wicker, S.B.: Selfish users in Aloha: a Game-Theoretic Approach. Proc. VTC 2001 Fall, Vol. 3, Atlantic City, NJ, USA, 2001
- [MW01b] MacKenzie, A.B.; Wicker, S.B.: Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks. IEEE Comm. Mag., Nov. 2001
- [HI96] Holler, M.J.; Illing, G.: Einführung in die Spieltheorie (3. Auflage). Springer Lehrbuch, 1996
- [Fa98] Famolari, D.; et al.: A New Framework for Power Control in Wireless Data Networks: Games, Utility, and Pricing. Proc. 33th. Allerton Conf. On Communications, Control and Computing, University of Illinois, Urbana, USA, 1998
- [FMG99] Feng, N.; Mandayam, N.B.; Goodman, D.J.: Joint Power and Rate Optimization for Wireless Data Services Based on Utility Functions. Proc. CISS'99
- [SMD99] Saraydar, C.U.; Mandayam, N.B.; Goodman, D.J.: Pareto Efficiency of Pricing-based Power Control in Wireless Data Networks. Proc. WCNC 1999
- [MW01c] MacKenzie, A.B.; Wicker, S.B.: Game Theory in Communications: Motivation, Explanation, and Application to Power Control. Proc. Globecom 2001