Selten, Reinhard

Working Paper

Die konzeptionellen Grundlagen der Spieltheorie einst und jetzt

Bonn Econ Discussion Papers, No. 2/2001

Provided in Cooperation with:
Bonn Graduate School of Economics (BGSE), University of Bonn

BONN ECON DISCUSSION PAPERS

Discussion Paper 2/2001

Die konzeptionellen Grundlagen der Spieltheorie einst und jetzt

by

Reinhard Selten

January 2001

Bonn Graduate School of Economics
Department of Economics
University of Bonn
Adenauerallee 24 - 42
D-53113 Bonn

The Bonn Graduate School of Economics is sponsored by the

Deutsche Post World Net

MAIL EXPRESS LOGISTICS FINANCE

Die konzeptionellen Grundlagen der Spieltheorie einst und jetzt

Reinhard Selten

Universität Bonn

Abstract

Das fundamentale Werk von John von Neumann und Oskar Morgenstern (1944) hat die Spieltheorie als Gebiet begründet. Es gab zwar vorher schon den in deutscher Sprache veröffentlichen Beitrag von John Neumann (1928) „ Zur Theorie der Gesellschaftsspiele“, aber erst mit dem Buch aus dem Jahre 1944 wurde in der wissenschaftlichen Welt genügend Aufmerksamkeit erregt, um einen breiteren Strom von Forschung in Gang zu setzen. Die offenen Fragen, vor allem im Bereich der kooperativen von Neumann-Morgenstern-Lösungen, boten Anknüpfungspunkte für mathematisch anspruchsvolle weiterführende Forschung.

In diesem Beitrag soll dargestellt werden, wodurch sich das spieltheoretische Konzept von von Neumann und Morgenstern von den heute vorherrschenden Auffassungen unterscheidet, und wie es aus der damaligen Zeit heraus verstanden werden kann.

Keywords
kooperative Spieltheorie, kardinale Nutzentheorie, Zwei-Personen-Nullsummenspiele, von Neumann-Morgenstern-Lösungen, charakteristische Funktion

JEL Classification Codes
B21, B 30, C70, C71

Autor

Prof. Dr. Reinhard Selten
Laboratorium für experimentelle Wirtschaftsforschung
Universität Bonn
Adenauerallee 24-42, D-53113 Bonn
fax: 49-228-73-9193
phone: 49-228-73-9192
selten@lab.econ1.uni-bonn.de

1. Einleitung

Das fundamentale Werk von John von Neumann und Oskar Morgenstern (1944) hat die Spieltheorie als Gebiet begründet. Es gab zwar vorher schon den in deutscher Sprache veröffentlichen Beitrag von John Neumann (1928) „ Zur Theorie der Gesellschaftsspiele“, aber erst mit dem Buch aus dem Jahre 1944 wurde in der wissenschaftlichen Welt genügend Aufmerksamkeit erregt, um einen breiteren Strom von Forschung in Gang zu setzen. Der Inhalt bot eine Fülle von Material für Vorlesungen über Spieltheorie. Die offenen Fragen, vor allem im Bereich der kooperativen von Neumann-Morgenstern-Lösungen, boten Anknüpfungspunkte für mathematisch anspruchsvolle weiterführende Forschung.

Es ist nicht meine Absicht, eine historische Abhandlung über die Entwicklung der Spieltheorie zu schreiben. Das, was ich hier mitteilen möchte, hat eher den Charakter eines Zeitzeugenberichts. In den frühen fünfziger Jahren lieh ich mir das Buch von von Neumann und Morgenstern in der Bibliothek des mathematischen Seminars der Universität Frankfurt aus. Ich war damals ein Student der Mathematik in den mittleren Semestern. Ich habe das Buch noch als Lehrbuch benutzt, allerdings bevor ich Gelegenheit hatte, eine Vorlesung über das Thema zu hören. Das geschah erst etwas später bei meinem verehrten Lehrer, Ewald Burger.

Wer heute Spieltheorie lernen will, muß zu einem modernen Lehrbuch greifen, zum Beispiel dem von Osborne und Rubinstein (1994). Dies liegt nicht nur daran, daß einige bei von Neumann und Morgenstern offene Probleme inzwischen gelöst sind. Die Auffassungen darüber, was Spieltheorie ist und was sie sein sollte, sind keinem steten Wandel unterworfen. Es werden heute zum Teil ganz andere Fragen gestellt als damals. Von Neumann und Morgenstern hatten eine klare Vorstellung von dem, was sie erreichen wollten. Es soll nun dargestellt werden, wodurch sich ihr Konzept von den heute vorherrschenden Auffassungen unterscheidet und wie es aus der damaligen Zeit heraus verstanden werden kann.

Der Stil der Darstellung wird nicht der einer mathematischen Abhandlung sein, sondern eher der einer Einleitung zu einer ökonomischen Arbeit. Es werden keine Formeln verwendet, aber es wird trotzdem Genauigkeit der Darstellung angestrebt, soweit das ohne Verwendung mathematischer Symbole möglich ist.

2. Grundlagen

2.1 Das Nutzenproblem

Als von Neumann und Morgenstern ihr Buch schrieben, gab es in der Wirtschaftswissenschaft die weit verbreitete Lehrmeinung, daß Präferenzen nur ordinal sein können. In der Theorie des Haushalts werden die Präferenzen durch Indifferenzkurvensysteme beschrieben. Man kann leicht eine Nutzenfunktion finden, die die Präferenzen richtig widerspiegelt. Ein Güterbündel mit höherem Nutzen wird einem anderen mit niedrigerem Nutzen vorgezogen. Die Nutzenfunktion ist aber nur bis auf steigende monotone Transformationen durch die Präferenzen bestimmt. Es ist daher nicht sinnvoll, mit Nutzenzahlen arithmetische Berechnungen vorzunehmen, da Addition und Multiplikation nicht gegenüber monotonen Transformationen invariant sind.

Von Neumann und Morgenstern haben gezeigt, daß es dennoch möglich ist, einen kardinalen Nutzen zu begründen, indem man zu Präferenzen zwischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die betrachteten Objekte übergeht. Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung wird dabei als eine „Lotterie" aufgefaßt, die festlegt, was man mit welchen Wahrscheinlichkeiten erhält. Von Neumann und Morgenstern geben ein System plausibler Axiome für den Nutzen solcher Lotterien an. Eine Nutzenfunktion, die diesen Anforderungen genügt, ist bis auf positive lineare Transformationen eindeutig bestimmt. Der Nullpunkt und die Maßeinheit können beliebig gewählt werden, aber sonst nichts.

In der ersten Auflage des Buches wird das Axiomensystem zwar vorgestellt, aber der Beweis für die Eindeutigkeit bis auf positive lineare Transformationen wird dort nicht erbracht. Eine spätere Veröffentlichung in Econometrica wird angekündigt. Der Beweis erscheint schließlich in der zweiten Auflage.

Die Möglichkeit des Rechnens mit einem kardinalen Nutzen war für die Entwicklung der Spieltheorie von grundlegender Bedeutung. Die auf Pareto (1907) zurückgehende Lehrmeinung des ausschließlich ordinalen Charakters der Präferenzen mußte überwunden werden. Ohne einen kardinalen Nutzen wäre die Bestimmung eines erwarteten Nutzens nicht sinnvoll, und man könnte Kombinationen von gemischten Strategien keine Auszahlungen zuordnen. Deshalb mußten sich von Neumann und Morgenstern mit diesem Problem auseinander setzen, obwohl es nicht im Mittelpunkt ihres Interesses stand.

Der auf Präferenzen über Lotterien gestützte kardinale Nutzen wird heute allgemein „von Neumann-Morgenstern-Nutzen" genannt. Das Konzept hat einen großen Einfluß auf die Wirtschaftstheorie ausgeübt, auch außerhalb der Spieltheorie. Man kann sich heute kaum noch vorstellen, welche Umwälzung mit dem Übergang vom Ordinalismus zum Kardinalismus verbunden war.

Von Neumann und Morgenstern waren sich im Klaren darüber, daß ihr Nutzenkonzept nicht alle Probleme des Risikoverhaltens lösen kann. Sie weisen zum Beispiel darauf hin, daß der reine Nutzen des Glücksspiels durch die Axiome nicht erfaßt wird. Es handelt sich dabei um die aus der Unsicherheit des Ergebnisses entstehende Spannung, die die Lotteriepräferenzen positiv oder negativ beeinflussen kann (siehe von Neumann und Morgenstern 1944, Abschnitt 3.7.1). Aus späteren Äußerungen von Oskar Morgenstern geht hervor, daß er dieses Problem sehr ernst nahm (Morgenstern 1979, Pope 1997).

Der Aufbau einer bahnbrechend neuen Theorie erfordert es manchmal, daß man sich über manche mögliche Einwände einfach hinwegsetzt und ihre genauere Untersuchung einer späteren Zeit überläßt. Nur so können Fortschritte erzielt werden.

Wer moderne Axiomatisierungen kennt, wird vielleicht zunächst darüber verwundert sein, daß bei von Neumann und Morgenstern der zugrundeliegende Lotterieraum nicht explizit modelliert wird. Ein Nutzenwert wird sozusagen mit einer Indifferenzklasse von Lotterien identifiziert. Der mathematische Charakter der Nutzenwerte bleibt dabei zunächst offen. Es stellt sich erst später heraus, daß die Nutzenwerte durch reele Zahlen dargestellt werden können und zwar eindeutig bis auf eine positive lineare Transformation. Die Axiome betreffen ordinale Effekte von Operationen wie zum Beispiel der Bildung zusammengesetzter Lotterien. Diese Operationen werden durch einen zunächst abstrakt zu interpretierenden Nutzenkalkül abgebildet. Der Zusammenhang mit den zugrundeliegenden Lotterien ist ein Teil der Interpretation der Axiome; es wird in den Axiomen selbst nicht darüber gesprochen.

Eine Axiomatisierung, die die bewerteten Objekte und Lotterien explizit einführt ist leichter zu verstehen. Ein besonders einfaches Axiomensystem findet man bei Luce und Raiffa (1957).

2.2 Spielformen

Bei von Neumann und Morgenstern findet man bereits die wichtigsten Modellierungsinstrumente für die Beschreibung von Spielsituationen: die extensive Form, die Normalform und die charakteristische Funktion. Allein die Bereitstellung dieses Instrumentariums war eine große Leistung von bleibender Bedeutung. Die Theorien, die man heute in der Literatur findet, sind auf diese Spielformen bezogen, oder auf ihre Verallgemeinerungen und Abwandlungen, auch dann, wenn sie abgesehen davon, von einem ganz anderen Ansatz ausgehen als von Neumann und Morgenstern.

Die ausführlichste Beschreibung einer Spielsituation ist die extensive Form, in der genau modelliert wird, wer an welcher Stelle eines möglichen Spielverlaufs mit welchen Informationen über das bisherige Spielgeschehen welche Entscheidung zu treffen hat, wann das Spiel endet, und welche Auszahlungen die Spieler in Abhängigkeit von dem Spielverlauf erhalten. Eine reine Strategie ist ein vollständiger Verhaltensplan für einen Spieler, der für jede mögliche Spielsituation, in der er zu entscheiden hat, eine Entscheidung vorsieht.

Aus einer extensiven Form kann eine Normalform abgeleitet werden. Die Normalform beschreibt nur noch den Zusammenhang zwischen den Strategien und den Auszahlungen. Im Falle eines Zwei-Personenspiels kann die Normalform als Bimatrix dargestellt werden. Die Zeilen entsprechen den reinen Strategien des Spielers 1 und die Spalten den reinen Strategien des Spielers 2. In jedem Feld sind die Auszahlungen für beide Spieler eingetragen, die mit den entsprechenden Strategien erzielt werden.

Für von Neumann und Morgenstern enthielt die Normalform alle wesentlichen Informationen, so daß sie sich nicht lange bei der extensiven Form aufzuhalten brauchten. Das war von ihrem Standpunkt aus gesehen auch richtig. Für später entwickelte Konzepte, wie das des perfekten Gleichgewichts (Selten 1965, 1975), erwies es sich aber als günstig, direkt an der extensiven Form anzuknüpfen.

Eine Teilmenge der Spielermenge wird als Koalition bezeichnet. Eine charakteristische Funktion weist jeder Koalition eine Koalitionsauszahlung zu, den „Wert“ dieser Koalition. Von Neumann und Morgenstern leiten die charakteristische Funktion aus der Normalform ab. Wir werden später darauf zurückkommen, wie das geschieht.

3. Theorie der Zwei-Personen-Nullsummenspiele

3.1 Gemischte Strategien und Sicherheitsschranken

In der Spieltheorie betrachtet man neben den reinen Strategien auch gemischte Strategien. Eine gemischte Strategie eines Spielers ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über seinen reinen Strategien. Man stellt sich vor, daß ein Spieler erst einen Zufallsmechanismus betätigt, zum Beispiel ein Glücksrad, und dann in Abhängigkeit von dem Zufallsergebnis eine reine Strategie wählt.

Betrachten wir als Beispiel das folgende einfache Zwei-Personenspiel: Spieler 1 nimmt ein Streichholz in die linke oder die rechte Hand. Dann muß Spieler 2 raten, in welcher Hand sich das Streichholz befindet. Er weiß nicht, was Spieler 1 getan hat. Rät Spieler 2 richtig, so erhält er einen Euro von Spieler 1. Andernfalls muß er einen Euro an Spieler 2 zahlen.

Es gibt nur zwei mögliche Auszahlungen. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit können deshalb die Nutzenfunktionen beider Spieler so normiert werden, daß ein Gewinn den Nutzen +1 und ein Verlust den Nutzen –1 hat. Es handelt sich also auch in Nutzenauszahlungen um ein Zwei-Personen-Nullsummenspiel.

Von Neumann und Morgenstern betonen, daß ihre Theorie statisch ist. Damit ist gemeint, daß sich die Theorie auf sogenannte „Einmalspiele" bezieht, die von den selben Spielern nur einmal gespielt werden. Es ist daher wichtig, die Idee der gemischten Strategie in diesem Kontext zu verstehen.

Betrachten wir die Situation des Spielers 1 im Streichholzspiel. Es ist für ihn sinnvoll, eine gemischte Strategie zu spielen, die jede seiner Alternativen mit der Wahrscheinlichkeit ½ wählt. Auf diese Weise erreicht er eine Gewinnwahrscheinlichkeit von ½ und damit eine erwartete Auszahlung von Null, unabhängig davon, was der andere tut. Spieler 2 kann ebenfalls eine Gewinnwahrscheinlichkeit von ½ erreichen, indem er seine beiden Alternativen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit wählt. Spieler 1 kann gegen diese gemischte Strategie keine größere Gewinnwahrscheinlichkeit durchsetzen als ½.

Würde der Spieler 1 mit einer größeren Wahrscheinlichkeit als ½ „links" wählen, so könnte Spieler 2, wenn er das weiß, „links" raten und damit eine höhere Gewinnwahrscheinlichkeit erzielen als ½. Ähnliches gälte natürlich für den Fall, daß Spieler 1 „rechts" mit mehr als Wahrscheinlichkeit ½ wählt. Die Wahl jeder der beiden Alternativen mit der Wahrscheinlichkeit ½ schützt den Spieler 1 vor nachteiligen Folgen des Durchschautwerdens durch Spieler 2.

Dieser Schutz vor der Durchschaubarkeit steht im Vordergrund der Interpretation der gemischten Strategie bei von Neumann und Morgenstern. Eine allgemein anerkannte und absolut überzeugende Theorie kann von allen durchschaut werden. Jeder weiß, was dem anderen rational empfohlen wird. Eine rationale Empfehlung ist durchschaubar und muß gerade deshalb so gut wie möglich vor nachteiligen Folgen der Durchschaubarkeit schützen.

Diese Argumentation findet man bei von Neumann und Morgenstern im Abschnitt 17.3.3. Es wird aber betont, z.B. in Fußnote 3) von 17.3.3, daß es sich bei dem Schutz vor Durchschaubarkeit nur um eine notwendige, nicht aber um eine hinreichende Bedingung für eine rationale Theorie handelt.

Wir betrachten nun ein beliebiges Spiel in Normalform. Eine „Kombination“ von Strategien ist ein Vector, der für jeden Spieler genau eine reine oder gemischte Strategie enthält. Da die Auszahlungen von Neumann-Morgenstern-Nutzen sind, können für jede derartige Kombination erwartete Auszahlungen für alle Spieler berechnet werden.

Zu jeder reinen oder gemischten Strategie gehört eine „Sicherheitsschranke“; es ist dies das Minimum der erwarteten Auszahlung, die mit dieser Strategie erreicht werden kann. Die Strategie mit der maximalen Sicherheitsschranke heißt „Maximin-Strategie“. Die maximale Sicherheitsschranke ist der „Wert“ des betreffenden Spielers.

In dem Streichholzspiel ist die Wahl beider Alternativen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit die Maximinstrategie für beide Spieler. Jeder der beiden Spieler hat dort den Wert Null.

3.2 Maximin und Gleichgewicht

Ein Nullsummenspiel ist dadurch gekennzeichnet, daß die Summe der Auszahlungen an alle Spieler für jede Kombination reiner Strategien Null ist. Diese Eigenschaft überträgt sich auf Erwartungsauszahlungen für Kombinationen gemischter Strategien. In einem Zwei-Personen-Nullsummenspiel ist der Gewinn des einen der Verlust des anderen.

John von Neumann hat in seiner Arbeit „Zur Theorie der Gesellschaftsspiele“ (1928) das erste wichtige Theorem der Spieltheorie bewiesen. Er hat gezeigt, daß die Summe der Werte für beide Spieler in einem Zwei-Personen-Nullsummenspiel Null ist. Dieses keineswegs selbstverständliche Ergebnis wird häufig Hauptsatz der Spieltheorie genannt. Die Bezeichnung ist darauf zurückzuführen, daß dieses Theorem für von Neumann und Morgenstern tatsächlich der Grundstein ihres Theoriegebäudes war.

In jedem Zwei-Personenspiel kann sich jeder der beiden Spieler seinen Wert mit Hilfe der Maximinstrategie sichern. In Zwei-Personen-Nullsummenspielen gilt darüber hinaus, daß auch nicht mehr als das erreicht werden kann, wenn der andere ebenfalls seine Maximinstrategie verwendet. Das ergibt sich daraus, daß die Summe der beiden Werte Null ist. Das bedeutet, daß jedes Paar von Maximinstrategien ein Gleichgewicht im Sinne von Nash (1951) ist. Ein Gleichgewicht für ein n-Personenspiel in Normalform ist eine Strategienkombination mit einer Strategie für jeden Spieler, in der jede Strategie die „beste Antwort“ auf die Strategien der anderen ist, d.h. mit der Gleichgewichtsstrategie wird gegen die Gleichgewichtsstrategien der anderen die höchste erwartete Auszahlung erzielt.

Der Gleichgewichtsbegriff kommt in seiner vollen Allgemeinheit bei von Neumann und Morgenstern nicht vor. In der modernen Spieltheorie hat er jedoch eine zentrale Bedeutung. Eine rationale Theorie, die jedem Spieler eine eindeutige Empfehlung gibt, muß ein Gleichgewicht spezifizieren, weil sie sonst eine selbstzerstörerische Prophezeihung wäre; mindestens einer der Spieler könnte durch Abweichung eine höhere erwartete Auszahlung erzielen, wenn alle anderen der Empfehlung folgen. Der Gleichgewichtsbegriff formuliert also eine notwendige Bedingung für eine eindeutige rationale Empfehlung.

Von Neumann und Morgenstern haben einen anderen Rationalitätsbegriff als die moderne Spieltheorie. Sie gehen zwar davon aus, daß eine überzeugende Theorie die Gleichgewichtseigenschaft haben muß, denn jeder muß damit rechnen, daß sie auch den anderen bekannt ist. Es ist daher wichtig, daß in Zwei-Personen-Nullsummenspielen die Maximinstrategie Schutz vor Durchschaubarkeit bietet. Dies ist aber nur eine notwendige Bedingung für eine rationale Empfehlung, aber keine hinreichende. Es ist schon erwähnt worden, daß das in Abschnitt 17.3.3 ausdrücklich gesagt wird.

Es genügt nicht, alles andere auszuschließen, es müssen auch positive Gründe dafür angegeben werden können, daß man in Zwei-Personen-Nullsummenspiel eine Maximinstrategie verwenden soll. Ein positiver Grund wird darin gesehen, daß die Maximinstrategie nicht nur das beste erreicht, falls der andere ebenfalls eine Maximinstrategie wählt, sondern daß sie darüber hinaus den Wert auch dann sichert, wenn sich der andere irrational verhält. Man muß zwar mit der Rationalität des Gegners rechnen, darf sich aber nicht absolut darauf verlassen. In Abschnitt 4.1.2 finden wir die Bemerkung:

> ...the rules of rational behaviour must provide definitely for the possibility of irrational conduct on the part of others.

Ein anderer positiver Grund besteht darin, daß sich die Werte zu Null ergänzen, und deshalb kein Raum für Kooperation offen bleibt.

3.3 Wahrscheinlichkeitsbegriff und Indeterminismus

Als von Neumann und Morgenstern vor der Aufgabe standen, die Spieltheorie zu entwickeln, herrschte die frequentistische Deutung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs vor. Die Wahrscheinlichkeit wurde als Grenzwert der relativen Häufigkeit aufgefaßt (von Mises 1928). Dabei handelt es sich natürlich um sogenannte objektive Wahrscheinlichkeiten. Die Idee der subjektiven Wahrscheinlichkeit wurde meist strikt abgelehnt.

Neyman und Pearson hatten gezeigt, wie man statistische Tests auf objektiven Wahrscheinlichkeiten für Fehler erster und zweiter Art unter der Nullhypothese aufbauen kann (Neyman 1934). Dieser Ansatz beherrscht auch heute noch die Praxis der statistischen Tests. Der Bayesianismus in der Spiel- und Entscheidungstheorie fand erst nach der gemeinsamen Axiomatisierung von Nutzen und subjektiver Wahrscheinlichkeit durch Savage (1954) weite Verbreitung.

Es verwundert deshalb nicht, daß von Neumann und Morgenstern nur objektive Wahrscheinlichkeiten betrachten. Ein Bayesianischer Spieler muß eine subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung über das Verhalten der anderen Spieler haben und auf dieser Grundlage seine erwartete Auszahlung maximieren. Von daher gesehen erscheint das Maximinprinzip als fragwürdig. Es liegt vielmehr nahe, die Bildung subjektiver Wahrscheinlichkeiten auf die Idee einer allgemein bekannten Rationalität aller Spieler zu stützen. Das führt unmittelbar zum Gleichgewichtsbegriff.

Im Einklang mit ihrer Zeit näherten sich von Neumann und Morgenstern dem Problem der strategischen Unsicherheit auf andere Weise. Sie verzichten darauf, eindeutig festzulegen, was von den Gegenspielern zu erwarten ist. Sie streben eine Analyse an, die nur von dem ausgeht, was gesichert werden kann. Im allgemeinen wird das Verhalten in Spielsituationen durch ihren Rationalitätsbegriff nicht eindeutig bestimmt. Außerhalb des engen Rahmens der Zwei-Personen-Nullsummenspiele entsteht dadurch Raum für andere Einflußfaktoren. Man könnte hier an freie Willensentscheidungen denken. In diesem Sinne nehmen von Neumann und Morgenstern einen indeterministischen Standpunkt ein. In ihrem Buch wird allerdings, soweit ich sehen kann, nicht über das Problem der Willensfreiheit gesprochen.

Der Philosoph Julius Kraft, bei dem ich in Frankfurt Soziologievorlesungen hörte, vertrat im Anschluß an Kant und Leonhard Nelson die Lehre von der Willensfreiheit. Er äußerte sich deshalb außerordentlich positiv über den Indeterminismus der damaligen Spieltheorie.

4. Allgemeine Theorie

4.1 Kooperation

Die Unterscheidung von nichtkooperativen und kooperativen Spielen gab es bei von Neumann und Morgenstern nicht. Sie findet sich erst bei Nash (1951). Bei von Neumann und Morgenstern findet sich eine andere Unterscheidung, nämlich die zwischen essentiellen und inessentiellen Spielen. Ein Spiel wird „inessentiell" genannt, wenn die Summe der Werte bereits die maximal erreichbare Auszahlungssumme ist. Andere Spieler heißen „essentiell".

Der Name ist vielleicht etwas unglücklich gewählt. Inessentiell bedeutet nicht unwichtig. Es ist ja gerade der Inhalt des Hauptsatzes der Spieltheorie, daß in Zwei-Personen-Nullsummenspielen die Summe der Werte beider Spieler Null ist. Dennoch sind diese Spiele für die von Neumann und Morgenstern entwickelte Theorie von grundlegender Bedeutung.

In inessentiellen Spielen ist Kooperation weder erforderlich noch sinnvoll. Wenn dort jeder Spieler seine Maximinstrategie spielt, wird damit die höchstmögliche Gesamtauszahlung erzielt. Insofern sind inessentielle Spiele vom Standpunkt der kooperativen Spieltheorie her gesehen tatsächlich uninteressant.

Von Neumann und Morgenstern gehen davon aus, daß in essentiellen Spielen stets kooperiert wird. Es kommt nicht vor, daß eine profitable Kooperationsmöglichkeit offen bleibt. Diese Annahme wird häufig „Coase Theorem" genannt, der einschlägige Artikel von Coase (1960) stammt aber erst aus einer späteren Zeit.
Die Kooperation vollzieht sich nach von Neumann und Morgenstern durch Vereinbarungen außerhalb der Regeln des Spieles. Das bedeutet, daß die Spielregeln Vertragsvorschläge und Vertragsabschlüsse nicht explizit modellieren müssen. Von Neumann und Morgenstern sprechen zwar davon, daß ein Spiel Kooperation innerhalb der Regeln vorsehen kann. In der Fußnote 4 von Abschnitt 21.1.2 wird angedeutet, wie das aussehen könnte. Sie kommen aber in diesem Abschnitt bei der Diskussion des einfachen Majoritätsspiels zu der folgenden Schlußfolgerung:

> Thus there seems to be no escape from the necessity of considering agreements concluded outside the game. If we do not alllow for them, then it is hard to see what, if anything, will govern the conduct of a player in a simple majority game.

Heute geht man häufig den Weg der nichtkooperativen Modellierung der Kooperation. Man betrachtet Spiele in extensiver Form mit explizit in den Regeln formulierten Kooperationsmöglichkeiten und erklärt Kooperation als gleichgewichtiges Verhalten (z.B. Harsanyi 1974, Selten 1981). Einen Überblick bietet der Handbuchartikel von Binmore, Osborne und Rubinstein (1992). Die nichtkooperative Modellierung der Kooperation stellt sich auf den Standpunkt, daß ein Spiel mit Kooperation außerhalb der Regeln einfach nicht detailliert genug modelliert ist. Wenn die Spielregeln die Situation hinreichend detailliert beschreiben, wird es möglich, die Frage danach, ob und in welchem Umfang kooperiert wird, durch Gleichgewichtsanalyse zu entscheiden. Die Kooperation wird so endogen erklärt. Darin liegt heute der eigentliche Unterschied zwischen nichtkooperativer und kooperativer Spieltheorie. Für die kooperative Theorie ist die Kooperation eine Annahme, für die nichtkooperative Theorie ist sie ein mögliches Ergebnis.

Die kooperative Spieltheorie ist ein Abkürzungsweg für die volle nichtkooperative Modellierung. Von Neumann und Morgenstern haben vielleicht die Möglichkeit des längeren Wegs gesehen, aber sie haben sich für den kürzeren entschieden. Das liegt vielleicht auch daran, daß sie in der Annahme einer alles ausschöpfenden Kooperation außerhalb der Spielregeln die einzige Möglichkeit sahen, essentielle Spiele in den Griff zu bekommen.

Die in der Literatur befindlichen nichtkooperativen Modellierungen der Kooperation arbeiten mit dem Gleichgewichtskonzept. Die Aufnahme von Vertragsvorschlags- und Abschlußmöglichkeiten in die Spielregeln verändert zwar die Gleichgewichte, aber normalerweise nicht die Werte. Wenn es jedem Spieler frei steht, die Kooperation zu verweigern, kann man sich nicht mehr sichern als im ursprünglichen Spiel. Für den auf Maximinstrategien beruhenden Rationalitätsbegriff, den von Neumann und Morgenstern vertreten, ist damit nichts gewonnen. Sie hatten vermutlich sogar recht damit, daß die Annahme ausschöpfender Kooperation außerhalb der Spielregeln für sie unverzichtbar war.

4.2 Spiele mit vollkommener Information

Im Zusammenhang mit Spielen in extensiver Form spricht man von vollkommener Information, wenn jeder Spieler bei jedem Zug voll über den bisherigen Spielverlauf informiert ist. Mühle, Dame und Schach sind Beispiele für Spiele mit vollkommener Information. Man kann für solche Spiele durch Rückwärtsinduktion ein Gleichgewicht oder, genauer gesagt, ein teilspielperfektes Gleichgewicht bestimmen. Man betrachtet zunächst die Spielsituationen kurz vor dem Ende des Spiels, in denen nur noch eine Entscheidung zu treffen ist. Man legt für jede dieser Situationen eine derjenigen Entscheidungen fest, die dem jeweils entscheidenden Spieler die maximale Auszahlung verspricht. Die Konstruktion des Gleichgewichts wird dann mit denjenigen Spielsituationen fortgesetzt, in denen nur eine noch nicht in dieser Weise festgelegte Entscheidung zu treffen ist. Man legt für jede derartige Situation eine Entscheidung fest, die unter Berücksichtigung der bisherigen Festlegungen dem jeweils entscheidenden Spieler die maximale Auszahlung verspricht. In dieser Weise fährt man fort, bis für alle Spielsituationen eine Entscheidung festgelegt wird. Die Festlegungen beschreiben dann ein Gleichgewicht des Spieles.

Wenn für jeden Spieler Auszahlungen nach verschiedenen Spielverläufen stets verschieden sind, dann ist das so konstruierte „Induktionsgleichgewicht“ sogar eindeutig bestimmt. In anderen Fällen kann es mehrere Induktionsgleichgewichte geben.

Der auf Nash (1951) zurückgehende Gleichgewichtsbegriff taucht bei von Neumann und Morgenstern nicht in voller Allgemeinheit auf, wohl aber der Spezialfall des Induktionsgleichgewichts.In Abschnitt 24.2.1 wird das Konzept vorgestellt und in den darauf folgenden Abschnitten wird es zurückgewiesen. Es wird auf die mangelnde Eindeutigkeit eingegangen, aber das Induktionsgleichgewicht wird auch dann als Lösung des Spieles abgelehnt, wenn es eindeutig bestimmt ist. Es wird darauf hingewiesen, daß ein Spieler der als vorletzter zu entscheiden hat, einem nach ihm als letzter entscheidenden möglicherweise einen für beide günstigen Vertrag vorschlagen kann. Ein solcher Vertrag würde den letzten gegen eine Ausgleichszahlung dazu verpflichten, einen Zug zu machen, der seine Auszahlung nicht maximiert, aber mehr für den vorletzten erreicht.

In einem Zwei-Personen-Nullsummenspiel mit vollkommener Information kann es natürlich nicht zu derartigen Kooperationsmöglichkeiten kommen, wohl aber in allgemeinen Zwei-Personen-Spielen oder Nullsummenspielen mit 3 oder mehr Spielern. Nach von Neumann und Morgenstern scheitert also das Induktionsgleichgewicht als allgemeines Konzept an der mangelnden Berücksichtigung von profitablen Kooperationsmöglichkeiten.

Auf der Grundlage der Überzeugung, daß nur die Annahme von Kooperation außerhalb der Regeln des Spieles einen Zugang zu einer systematischen Theorie bietet, die den Rahmen der Zwei-Personen-Nullsummenspiele übersteigt, war es nur folgerichtig das Induktionsgleichgewicht abzulehnen. Die Ablehnung trifft einen Spezialfall des allgemeinen Gleichgewichtsbegriffs von Nash (1951), der damit implizit ebenfalls zurückgewiesen wird, obwohl er bei von Neumann und Morgenstern nicht vorkommt.

4.3 Die charakteristische Funktion

Man spricht von einem Spiel mit transferierbarem Nutzen, wenn es ein Gut gibt, von dem die Nutzen der Spieler linear abhängen, und das von einem Spieler auf den anderen übertragen werden kann. Wir werden der Anschaulichkeit halber davon ausgehen, daß es sich bei diesem Gut um Geld handelt. Es bedeutet dann keine Einschränkung der Allgemeinheit anzunehmen, daß alle Auszahlungen Geldauszahlungen sind. In einem solchen „Spiel um Geld“ reduziert sich die Nutzenmaximierung auf die Maximierung des Erwartungswertes des Geldgewinns.

Von Neumann und Morgenstern beschränken sich bei der Entwicklung ihrer Theorie über den Rahmen der Zwei-Personen-Nullsummenspiele hinaus auf Spiele mit transferierbarem Nutzen. Wir werden, wie gesagt, die Theorie auf Spiele um Geld beziehen, und im Folgenden nur über solche Spiele sprechen, ohne dies jedesmal im Einzelnen zu erwähnen.

Wir betrachten ein n-Personenspiel in Normalform mit den Spielern 1,...,n. Eine „Koalition“ ist eine Teilmenge der Menge aller Spieler. Diese Definition schließt die leere Menge und die Menge aller Spieler als Spezialfälle ein. Die charakteristische Funktion des Spieles ordnet jeder Koalition einen Wert zu. Die leere Menge erhält den Wert Null. Die Koalition aller Spieler erhält die maximal mögliche Summe der Auszahlungen an alle Spieler als Wert.

Für eine Koalition, die mindestens einen, aber nicht alle Spieler enthält, bestimmt sich der Wert als Maximinauszahlung in einem „Koalitionsspiel“. Dieses Koalitionsspiel ist aus dem ursprünglichen Spiel in Normalform wie folgt abgeleitet. Die Spieler der Koalition werden zu einem Spieler zusammengefaßt. Die Auszahlung der Koalition ist die Summe der Auszahlungen an ihre Mitglieder, und die reinen Strategien der Koalition sind die koordinierten Strategienwahlen der Mitglieder. Die Spieler, die nicht zu der Koalition gehören, werden in der selben Weise zu einer Gegenkoalition zusammengefaßt.

Das Koalitionsspiel ist ein Zwei-Personenspiel. Der Wert der Koalition in der charakteristischen Funktion ist ihr Wert in ihrem Koalitionsspiel. (Wir erinnern daran, daß wir in Abschnitt 3.1 den Wert eines Spielers als seine maximale Sicherheitsschranke definiert haben.)

Falls das ursprüngliche Spiel ein Nullsummenspiel ist, so ist das Koalitionsspiel ein Zwei-Personen-Nullsummenspiel. In diesem Fall ist es ganz natürlich, den Wert einer Koalition in dieser Weise zu definieren. Eine Koalition muß damit rechnen, daß sich die Gegenkoalition bildet. Im Nullsummenspiel ist über die Werte von Koalition und Gegenkoalition hinaus nichts zu verteilen, und diese Werte können durch Maximinstrategien abgesichert werden.

Falls sich die Werte von Koalition und Gegenkoalition zu weniger als der maximal möglichen Auszahlungssumme für alle Spieler ergänzen, ist ein Überschuß zu verteilen. Da letzlich keine profitablen Kooperationsmöglichkeiten offen bleiben dürfen, müßte dieser Überschuß auf Koalition und Gegenkoalition aufgeteilt werden.

Es ist vermutlich diese Schwierigkeit, die von Neumann und Morgenstern dazu veranlaßt hat, ihre kooperative Lösungstheorie zunächst nur für Nullsummenspiele zu entwickeln. Die Ausweitung auf Nichtnullsummenspiele geschieht dann durch die künstliche Einführung eines fiktiven Spielers. Dadurch wird ein allgemeines n-Personen-Spiel in ein (n+1)-Personen-Nullsummenspiel verwandelt. Es kommt dabei nichts anderes heraus als bei der direkten Verwendung der charakteristischen Funktion für das n-Personenspiel. Rein formal betrachtet, handelt es sich um einen unnötigen Umweg. In der Tat ist der fiktive Spieler in modernen Darstellungen nicht mehr zu finden (vgl. Lucas 1992).

Es ist schwer vorstellbar, daß von Neumann und Morgenstern die Vermeidbarkeit des fiktiven Spielers nicht bemerkt haben. Es kam ihnen aber nicht nur auf die formale, sondern auch auf die inhaltliche Argumentation an. Aus diesem Grunde haben sie vielleicht ganz bewußt den Umweg über den fiktiven Spieler gewählt.

4.4 Die von Neumann-Morgenstern-Lösung

Von Neumann und Morgenstern haben in ihrem Buch das erste Lösungskonzept der kooperativen Spieltheorie vorgestellt. Es ist dies die von Neumann-Morgenstern-Lösung. Sie sprechen selbst nur von „Lösungen“, da es ja noch kein anderes Lösungskonzept gab, aber heute wird es häufig als „stabile Menge“ bezeichnet, um es von anderen Konzepten besser abzugrenzen.

Wir betrachten eine allgemeine charakteristische Funktion. (Wir werden den Umweg über den fiktiven Spieler hier nicht beschreiben). Zunächst muß gesagt werden, was für Spielergebnisse möglich sind. Von Neumann und Morgenstern stützen sich auf den Ergebnisbegriff der Imputation. Eine Imputation ist eine Aufteilung des Wertes der Koalition aller Spieler auf die einzelnen Spieler. Dabei muß jeder Spieler mindestens seinen Wert erhalten.

In einem inessentiellen Spiel gibt es nur eine Imputation. Essentielle Spiele dagegen haben einen großen Imputationenraum. Von Neumann und Morgenstern betrachten eine Dominanzbeziehung zwischen Imputationen. Eine Imputation „dominiert“ eine andere, wenn es eine Koalition gibt, die die folgenden beiden „Dominanzbedingungen“ erfüllt:

1. Durchsetzbarkeit: Die Summe der Auszahlungen an die Koalitionsmitglieder in der dominierenden Imputation darf nicht größer sein als der Wert dieser Koalition

2. Vorteilhaftigkeit: Jedes Mitglied der Koalition erhält in der dominierenden Imputation mehr als in der dominierten

Eine von Neumann-Morgenstern-Lösung oder kurz eine „Lösung“ ist eine Menge von Imputationen, die folgenden beiden Stabilitätsbedingungen erfüllt:

1. Innere Stabilität: Keine Imputation in der Lösung dominiert eine andere Imputation in der Lösung
2. Äußere Stabilität: Jede Imputation außerhalb der Lösung wird von einer Imputation innerhalb der Lösung dominiert.

Die Interpretation der Dominanzbeziehung ist unmittelbar einleuchtend: Es besteht die Möglichkeit des Übergangs von der dominierten zu der dominierenden Imputation. Dennoch ist diese Beziehung sehr komplex. Sie ist nicht transitiv, d.h. man kann nicht sagen, daß folgendes gilt: Wenn eine erste Imputation von einer zweiten dominiert wird und die zweite wiederum von einer dritten, so wird auch die erste von der dritten dominiert. — Es kann sogar vorkommen, daß sich zwei Imputationen gegenseitig dominieren.

Es ist wichtig, daß die Stabilitätsbedingungen an die Lösung als ganzes gerichtet sind und nicht isoliert an einzelne Imputationen. Deshalb ist es durchaus möglich, daß eine charakteristische Funktion mehrere Lösungen hat. Oft sind es sogar unendlich viele.

Von Neumann und Morgenstern interpretieren eine Lösung als einen Verhaltensstandard. Die Imputationen in der Lösung werden von der Gesellschaft als normal akzeptiert, und man erwartet, daß diese Verteilungen Bestand haben. Von den außerhalb der Lösung befindlichen Imputationen erwartet man das nicht. Die Stabilitätsbedingungen rechtfertigen diese Erwartungen. Es besteht keine Möglichkeit des Übergangs von einer Imputation in der Lösung zu einer anderen, und jede Abweichung zu einer Imputation außerhalb der Lösung führt wieder in die Lösung zurück.

Das Konzept der von-Neumann-Morgenstern-Lösung ist von faszinierender gedanklicher Kraft und hat viele Forscher in seinen Bann gezogen. Die Definition besticht durch Einfachheit, Tiefe und innere Geschlossenheit. Die Untersuchung der mathematischen Konsequenzen ist aber alles andere als einfach. Es kann hier nicht auf die Ergebnisse eingegangen werden, die Neumann und Morgenstern erzielt haben, und auch nicht auf die spätere Entwicklung der Forschung. Es sei auf den Übersichtsartikel von Lucas (1992) verwiesen.

Von Neumann und Morgenstern konnten die Frage nicht beantworten, ob es zu jeder charakteristischen Funktion mindestens eine Lösung gibt. Sie hielten dieses Existenzproblem für sehr wichtig. In Abschnitt 2.6.3 des Buches findet man die folgende Bemerkung:

> There can be, of course, no concessions as regards existence. If it should turn out that our requirements concerning a solution S are, in any special case, unfulfillable, - this would certainly necessitate a fundamental change of our theory.

Von Neumann und Morgenstern hofften natürlich, daß es einmal gelingen würde, die Existenz zu beweisen. Lucas (1968) hat jedoch ein bestimmtes 10-Personenspiel gefunden, von dem er nachweisen konnte, daß es keine Lösung hat. Ein spieltheoretisches Konzept kann jedoch auch dann interessant sein, wenn es nicht auf alle Spiele anwendbar ist

Heute ist die von Neumann-Morgenstern-Lösung ein Konzept der kooperativen Spieltheorie unter vielen. Es ist im Laufe der Zeit klar geworden, daß es nicht darum geht, den allein richtigen Ansatz herauszusuchen. Die kooperative Spieltheorie vermeidet die explizite Modellierung der Koalitionsmöglichkeiten und läßt daher unterschiedliche Konzepte zu, die nebeneinander bestehen können

Die von Neumann-Morgenstern-Lösung hat einen doppelt indeterministischen Charakter. Es bleibt unbestimmt, welche Imputation innerhalb einer Lösung realisiert wird. Diese Mehrdeutigkeit auf der Ebene der Imputation findet man auch in vielen anderen kooperativen Konzepten. Darüber hinaus bleibt es aber auch unbestimmt, welche von vielen Lösungen von der Gesellschaft als Verhaltensstandard akzeptiert wird

5. Theorie und Realität

Soweit ich sehen kann, sagen von Neumann und Morgenstern nichts darüber, ob ihre Theorie normativ oder deskriptiv ist. Eine deskriptive Theorie strebt die Beschreibung des tatsächlich beobachteten Verhaltens an. Eine normative Theorie dagegen sagt etwas darüber, wie ein rationales Individuum sich verhalten sollte.

Es gibt in der Wirtschaftswissenschaft eine methodologische Auffassung, die ich als „naiven Rationalismus“ bezeichne. Der Ausgangspunkt ist das Bild des voll rationalen „homo oeconomicus“, von dem angenommen wird, daß es im großen und ganzen die Wirklichkeit richtig widerspiegelt. Wenn man von dieser Auffassung ausgeht, ist eine strenge Unterscheidung von deskriptiver und normativer Theorie natürlich überflüssig.
In einer früheren Publikation (Selten 1998) habe ich die Meinung geäußert, daß von Neumann und Morgenstern auf dem Boden des naiven Rationalismus stehen. Ich bin jetzt zu der Überzeugung gekommen, daß das nur teilweise zutrifft. Von Neumann und Morgenstern stehen zwar in der Tradition des „homo oeconomicus“, aber sie verwenden in der Theorie der Zwei-Personen-Nullsummenspiele einen Rationalitätsbegriff, der die Möglichkeit des irrationalen Handelns auf der anderen Seite ausdrücklich einbezieht.

Das Konzept der Maximinstrategie ist offenbar normativ zu verstehen. Es erreicht eine Absicherung gegen rationales und nicht rationales Verhalten des Gegenspielers. Die Theorie der Zwei-Personen-Nullsummenspiele hat also eine normative Interpretation, die sich nicht auf den naiven Rationalismus stützt.

Die allgemeine Theorie ist etwas anders zu beurteilen. Die Annahme, daß die profitablen Kooperationsmöglichkeiten voll ausgeschöpft werden, kann als normatives Prinzip der kollektiven Rationalität verstanden werden. Ebenso kann der von-Neumann-Morgenstern-Lösung eine normative Interpretation gegeben werden. Die Möglichkeit, daß einige Spieler von der vollen Rationalität abweichen, findet aber dabei keine Berücksichtigung. Dennoch scheint hier, ohne daß das ausdrücklich gesagt wird, ein deskriptiver Anspruch auf der Grundlage des naiven Rationalismus erhoben zu werden.

In der Zeit, in der von Neumann und Morgenstern ihr Buch schrieben, war das Leitbild des homo oeconomicus vorherrschend. Das galt insbesondere für die formale Theorie. Die bahnbrechenden Arbeiten von Herbert Simon (1957) erschienen erst später und hatten bis vor kurzem nur einen geringen Einfluß auf die Theoriebildung.

Nach und nach hat die experimentelle und zum Teil auch die empirische Forschung eine Fülle von schwerwiegenden Abweichungen des tatsächlichen Verhaltens von der normativen Theorie aufgedeckt. Es ist jetzt klar, daß normative und deskriptive Theorie streng voneinander unterschieden werden müssen.

Von Neumann und Morgenstern haben mit ihrem Nutzenkonzept und der Bereitstellung des Instrumentariums der Spielformen einen großen Einfluß auf die experimentelle Wirtschaftsforschung ausgeübt. Viele experimentelle Fragestellungen sind noch heute von der Nutzentheorie und der Spieltheorie inspiriert. Erst aus der Auseinandersetzung mit den normativen Konzepten konnten neue deskriptive Ansätze entwickelt werden.

Ich habe John von Neumann nicht persönlich gekannt, aber ich hatte in den fünfziger und sechziger Jahren wiederholt Gelegenheit zu ausführlichen Gesprächen mit Oskar Morgenstern. Er hat die beginnende experimentelle Forschung mit Interesse und Wohlwollen verfolgt. Er war stets Veränderungen gegenüber sehr aufgeschlossen und hat niemals dogmatisch an irgendetwas festgehalten, was empirisch nicht haltbar war. Ich bin ihm für die Unterstützung dankbar, die er mir als jungem Forscher gewährt hat.

6. Abschließende Bemerkungen

Von Neumann und Morgenstern haben mit ihrem fundamentalen Werk einen außerordentlich starken Einfluß auf die Wirtschaftswissenschaft ausgeübt. Das Buch war der Ausgangspunkt einer kraftvollen Entwicklung der Spieltheorie zu einem umfangreichen Gebiet. Man findet heute Anwendungen auf fast alle Teilgebiete der Wirtschaftstheorie. Spieltheoretische Grundkenntnisse gehören zu dem selbstverständlichen Instrumentarium des Wirtschaftstheoretikers.

Auch außerhalb der Wirtschaftswissenschaften wird Spieltheorie angewandt, vor allem in der Politologie und in der biologischen Evolutionstheorie. Die biologische Spieltheorie hat die Aufmerksamkeit auf eine evolutorische Interpretation des Gleichgewichts als Ruhepunkt eines dynamischen Evolutionsprozesses in einer Population gelenkt. Dieser Gedanke ist auch in den Wirtschaftswissenschaften populär geworden.

Die Meinungen darüber, was Spieltheorie ist und was sie sein sollte, haben sich im Laufe der Zeit gewandelt, manchmal in überraschender Weise. Wir stehen jetzt vor der Aufgabe, aus der experimentellen Forschung heraus eine deskriptive Spieltheorie zu entwickeln, die eingeschränkt rationales strategisches Verhalten realistisch beschreibt.

Bei von Neumann und Morgenstern sah die Spieltheorie anders aus, als wir es heute gewohnt sind. Sie haben aber ein in sich folgerichtiges Programm verfolgt. Ihr Rationalitätsbegriff für Zwei-Personen-Nullsummenspiele ist strenger als der heute übliche, weil sie den Gleichgewichtsgedanken nur als notwendige, nicht aber als hinreichende Rationalitätsbedingung akzeptieren. Auf dieser Grundlage kann man allerdings keine allgemeine nichtkooperative Theorie aufbauen. Sie haben dafür eine Kooperation postuliert, die keine profitablen Einigungsmöglichkeiten offen läßt. Das erlaubte ihnen, zur charakteristischen Funktion überzugehen, allerdings nur für Nullsummenspiele, da nur dort die Theorie der Zwei-Personen auf die Koalitionsspiele anzuwenden ist. In diesem Rahmen entwickeln sie ihre Lösungstheorie.

Die Konstruktion der charakteristischen Funktion ist nur für den Fall der Nullsummenspiele wirklich überzeugend. Deshalb entschlossen sie sich dazu, andere Spiele durch Hinzufügung eines fiktiven Spielers in Nullsummenspiele zu verwandeln, anstatt die Lösungstheorie direkt anzuwenden.

Das Buch, das von Neumann und Morgenstern geschrieben haben, ist ein Monument der Wirtschaftsgeschichte. Es gab gute Gründe für den Weg, der in diesem Buch bei dem Aufbau einer Theorie der Spiele und des ökonomischen Verhaltens beschritten wurde. Von Neumann und Morgenstern sind auf diesem Weg erstaunlich weit vorangekommen. Das erste bedeutende Ergebnis war die Axiomatisierung des kardinalen Nutzens. Ein wichtiger Beitrag zur Grundlegung der Spieltheorie ist die Bereitstellung des auch heute noch allgemein genutzten Instrumentariums für die Modellierung von Spielsituationen: die extensive Form, der Strategiebegriff, die Normalform und die charakteristische Funktion. Auch die Theorie der Zwei-Personen-Nullsumenspiele gehört zum bleibenden Bestand des Gebietes. Das Konzept der von Neumann-Morgenstern-Lösung gehört zu den großen Ideen der kooperativen Spieltheorie.

Auch wenn heute andere Programme verfolgt werden, kann man nur bewundern, was von Neumann und Morgenstern geschaffen haben.

Literaturangaben:

1. Binmore, Ken, Martin J. Osborne and Ariel Rubinstein, (1992), „Noncooperative Models of Bargaining“, in: Robert J. Aumann and Sergiv Hart (eds.), *Handbook of Game Theory*, Vol. I, pp. 179-229, Amsterdam-London-New York-Tokyo: North Holland.

2. Coase, R.H., (1960), „The Problem of Social Coast“, in: *Journal of Law and Economics*, Vol. 3, pp. 1-44.

3. Harsanyi, J.C., (1974), „An Equilibrium-Point Interpretation of Stable Sets and a Proposed Alternative Definition“, in: *Management Science*, 20, pp. 1472-1495.

4. Lucas, W.F., (1968), „A Game with no Solution”, in: *Bulletin of the American Mathematical Society*, Vol. 74.

5. Lucas, W.F. (1992), „von Neumann-Morgenstern Stable Sets”, in: Robert J., Aumann and Sergiv Hart (eds.), *Handbook of Game Theory*, Vol. I, pp. 544-590, Amsterdam-London-New York-Tokyo: North Holland.

6. Luce, R.D. and H. Raiffa, (1957), *Games and Decisions*, New York: John Wiley and Sons.

7. Morgenstern, Oskar, (1979), „Some Reflections on Utility“, in: Maurice Allais and Ole Hagen (eds.), *Expected Utility and the Allais Paradox*, pp. 175-183, Dortrecht: D. Reidel.

8. Nash, J.F., (1951), „Non-cooperative Games“, in: *Annals of Mathematics*, Vol. 54, pp. 286-295.

9. Neyman, Jerzy, (1934), „On the Two Different Aspects of the Representative Method: the Method of Stratified Sampling and the Method of Purposive Selection“ in: *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 97, pp. 588-625.

10. Osborne, Martin J., and Ariel Rubinstein, (1994), *A Course in Game Theory*, Cambrigde Mass.-London, England: MIT-Press.

11. Pareto, V., (1907), *Mannuel d'Economie Politique*, Paris.

12. Pope, Robin F., (1997), „Debates on the Utility of Risk“, in: *Zeitschrift für Wissenschaftsforschung*, Vol. 11/12, pp. 102-151.

13. Savage, L., (1954), *The Foundations of Statistics*, New York: Wiley.

14. Selten, Reinhard, (1965a), „Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrageträgheit-Teil I: Bestimmung des dynamischen Preisgleichgewichts“, in: *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft*, Vol. 121, pp. 301-324.

15. Selten, Reinhard, (1965b), „Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrageträgheit-Teil II: Eigenschaften des dynamischen Preisgleichgewichts“, in: *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft*, Vol. 121, pp. 667-689.

16. Selten, Reinhard, (1975), „Reexamination of the Perfectness Concept for Equilibrium Points in Extensive Games“, in: *International Journal of Game Theory*, Vol. 4 (1), pp 25-55; reprinted in H.W. Kuhn (ed), *Classics in Game Theory*: Princeton: Princeton University Press, 1997, pp. 317-354.

17. Selten, Reinhard, (1981), „A Noncooperative Model of Characteristic Function Bargaining“, in: *Essays in Game Theory and Mathematical Economics in Honor of Oskar Morgenstern*, pp. 131-151; in: Gesellschaft, Recht, Wirtschaft, Band A, V. Bohm and H. Nachtkamp (eds.), Mannheim-Wien-Zürich: Wissenschaftsverlag Bibliographisches Institut.

18. Selten, Reinhard, (1998), „Game Theory, Experience, Rationality“, in: *Game Theory, Experience, Rationality*, pp. 9-34, W.Leinfellner and E. Köhler (eds.) Yearbook of the Vienna Circle Institute, Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers.

19. Simon, H.A., (1957), *Models of Man: Social and Rational*, New York- Wiley.

20. Von Neumann, J., (1928), „Zur Theorie der Gesellschaftsspiele“, in: *Mathematische Annalen*, Vol. 100, pp. 295-320. English translation: „On the Theory of Games of Strategy“, in: A.W. Tucker and R.D. Luce (eds.), *Contributions to the Theory of Games*, Vol. IV, Annals of the Mathematics Studies 40. Princeton: Princeton University Press.

21. Von Neumann, J. and O. Morgenstern, (1944), *Theory of Games and Economic Behavior*. Princton: Princeton University Press.

22. Von Mises, Richard, (1928), „Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit“, in: *Einführung in die neue Wahrscheinlichkeitslehre und ihre Anwendung*, Wien: Springer Verlag.