

Steuerung komplexer Systeme

Ergebnisse einer soziologischen Simulationsstudie

Von Fabian Adelt, Johannes Weyer und Robin D. Fink

Zusammenfassung: Die Frage, ob sich komplexe Systeme steuern lassen, beschäftigt die Sozialwissenschaften seit geraumer Zeit. Der folgende Beitrag bearbeitet das Thema „Steuerung komplexer Systeme“ mit Mitteln der experimentellen Soziologie, um auf diese Weise die Wirkung und die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Governance-Modi empirisch zu überprüfen. Zu diesem Zwecke wurde das Simulationsframework SUMO-S entwickelt, dessen soziologische Grundlagen das Modell soziologischer Erklärung (Esser) und das Modell der Frame-Selektion (Kroneberg) bilden. Die Performance von Governance wurde mittels dreier Makro-Indikatoren und zweier Mikro-Indikatoren vermessen. Überraschenderweise erreicht die zentrale Steuerung in der Regel bessere Werte als die dezentrale Koordination. Aber offenbar kommt es nicht allein auf den Governance-Modus an; denn es gibt einen – bislang wenig erforschten – Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit der Governance-Modi und der Zusammensetzung der Agentenpopulation.

1. Einleitung

Die Frage, ob sich komplexe Systeme steuern lassen, ist seit geraumer Zeit Gegenstand von Debatten in den Sozialwissenschaften (sowie in den Naturwissenschaften). Dabei wird immer wieder auf die Grenzen der Steuerbarkeit und Kontrollierbarkeit derartiger Systeme verwiesen, die ihre Ursache unter anderem in der Undurchschaubarkeit der Prozesse in komplexen Systemen haben (Luhmann 1988: 325; Mayntz 1987: 104; Grote 2009).

Auf der anderen Seite findet sich immer wieder ein verhaltener Steuerungsoptimismus (vgl. Simonis 1995), der jedoch meist mit einem Plädoyer für neuartige Steuerungsformen einhergeht, sei es die dezentrale Selbstorganisation, seien es Mixed-mode-Ansätze. Letztere gehen davon aus, dass eine Organisation mehr als nur einen Governance-Modus beherrschen und zudem in der Lage sein muss, entweder zwischen verschiedenen Modi zu wechseln oder diese Modi intelligent zu kombinieren (LaPorte / Consolini 1991; Roberts 1993).

Der vorliegende Beitrag unterbreitet einen Vorschlag, wie man das Thema „Steuerung komplexer Systeme“ experimentell untersuchen kann. Die Grundlage derartiger Experimente ist ein soziologisches Mikro-Makro-Modell, das Annahmen enthält, wie die Entscheidungen einer Vielzahl von Akteuren auf der Mikro-Ebene zu emergenten und sich dynamisch verändernden Systemzuständen auf der Makro-Ebene führen. Die soziologische Fundierung bildet Hartmut Essers Modell soziologischer Erklärung (MSE, vgl. Esser 1999), das die Systemdynamik der Makro-Ebene mit dem Handeln von Akteuren auf der Mikro-Ebene verknüpft und die Wechselwirkungen der beiden Ebenen in den Fokus der Analyse rückt.

Über Esser hinausgehend enthält unser Modell zudem Ansatzpunkte für Interventionen, die – je nach gewähltem Governance-Modus – unterschiedlich konfiguriert werden können. Auf diese Weise wird es möglich, die Wirkungsweise und die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Modi experimentell zu überprüfen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt eine konkrete Implementation des soziologischen Mikro-Makro-Modells, die sich der Methode der agentenbasierten Modellierung und Simulation (ABMS) bedient. Das von uns entwickelte Simulationsframework verfolgt den Zweck, ein

komplexes *soziales* System nachzubilden, dessen Dynamik sich aus der Wechselwirkung von Mikro- und Makro-Ebene ergibt. Darüber hinaus ist unser Anliegen, unterschiedliche Governance-Modi technisch zu implementieren und experimentell zu überprüfen. Wir wollen zeigen, dass Simulations-Experimente mit komplexen Systemen zu gehaltvollen Aussagen in Bezug auf steuerungstheoretische Fragen führen und die Debatte um die Steuerbarkeit komplexer Systeme bereichern können.

Mit Hilfe der Methode der Computersimulation haben wir Daten generiert, die es ermöglichen, die Wirkung steuernder Eingriffe in komplexe Systeme zu vermessen, um so unterschiedliche Governance-Modi vergleichen zu können, und zwar insbesondere die Modi der hierarchischen Steuerung und der dezentralen Koordination. Die z.T. überraschenden Ergebnisse, die sich aus diesen Experimenten ergaben, stehen wie bei jeder Simulationsstudie unter dem Vorbehalt, dass die Resultate nicht unmittelbar auf beliebige Realsysteme übertragen werden können. Es sind weitere Untersuchungen und Replikationen mit verschiedenen Szenarien notwendig, um unsere Befunde zu erhärteten und zu verallgemeinern.

Die folgende Abschnitt 2 beschreibt kurz das soziologische Modell, das als Basis des Simulationsframeworks dient, welches in Abschnitt 3 entwickelt wird. Abschnitt 4 beschreibt die Experimente und wertet die Daten mit Blick auf die Arbeitshypothesen aus, bevor Abschnitt 5 ein Fazit zieht und Ideen für künftige Forschungen entwickelt.

2. Theoretische Vorüberlegungen

Komplexe Systeme zeichnen sich durch nicht-lineare Verknüpfungen einer Vielzahl heterogener Elemente aus. Da die System-Komponenten (z.B. die individuellen Akteure) gewisse Freiheitsgrade besitzen, ist es schwer, ihre Entscheidungen, vor allem aber das aggregierte Ergebnis ihrer Einzelentscheidungen auf der Makro-Ebene des Systems, vorherzusagen, selbst wenn man die Regeln kennt, nach denen auf der Mikro-Ebene entschieden wird. Denn die Akteure werden nicht nur durch den momentanen Systemzustand beeinflusst; sie beeinflussen sich in ihren Handlungen auch wechselseitig, so dass das System permanent im Fluss ist und zum Teil überraschende Dynamiken generieren kann, die dann wiederum zum Input der Akteur-Entscheidungen werden (Richter / Rost 2004; Weyer / Schulz-Schaeffer 2009).

Bei komplexen Systemen, die in Echtzeit operieren, verschärft sich die Problematik der Intransparenz noch einmal durch den raschen Wechsel der Systemzustände sowie den Zeitdruck, unter dem sämtliche Aktionen stehen – die der einzelnen Akteure, aber auch die der Systemsteuerer. Ob derartige Systeme steuerbar und beherrschbar sind, ist somit eine offene Frage.

Will man das Thema „Steuerung komplexer Systeme“ theoretisch modellieren und experimentell überprüfen, so benötigt man zunächst präzise Definitionen der verwendeten Begriffe.

2.1 Begriffs-Definitionen

2.1.1 Governance

Der Begriff „Governance“ wird in den Sozialwissenschaften teilweise zur Kennzeichnung einer spezifischen Form nicht-hierarchischer Steuerung, teilweise aber auch als Oberbegriff für unterschiedliche Formen der Koordination und Steuerung verwendet (Benz et al. 2007; Treib et al. 2007). Aus pragmatischen Gründen entscheiden wir uns für folgende Definition (vgl. Weyer et al. 2013):

(DEF-1) Governance ist ein Oberbegriff für unterschiedliche Formen der Koordination und Steuerung in sozialen Systemen.

2.1.2 Steuerung

Auch bezüglich steuerungstheoretischer Fragen herrscht nur teilweise Konsens in der Community. Dem Luhmann'schen Steuerungspessimismus (1988) steht ein verhaltener Steuerungsoptimismus beispielweise bei Willke (1989, 2007) oder Mayntz und Scharpf (1995) gegenüber, welche sich – ungeachtet aller Eigendynamiken und Resistenzen – eine planvolle Gestaltung und Veränderung sozialer Systeme durchaus vorstellen können. Wir schlagen daher folgende Definition vor:

(DEF-2) Steuerung ist die intentionale Intervention in soziale Systeme mit dem Ziel, intendierte Veränderungen zu bewirken.

Diese Definition geht davon aus, dass Steuerung durchaus misslingen bzw. an der Resistenz der gesteuerten Systeme scheitern kann. Steuerung ist demnach der *Versuch*, in Systeme zu intervenieren und dort Effekte zu erzielen, nicht jedoch die Fähigkeit, Systeme nach Belieben zu manipulieren. Zu Definition DEF-2 gelten daher folgende Randbedingungen:

(RB-1) Steuerung vollzieht sich als gerichtete Beziehung zwischen einem Steuerungssubjekt und einem oder mehreren Steuerungsobjekten (Diese analytische Unterscheidung greift auch dann, wenn Steuerungssubjekt und -objekt identisch sind – etwa im Fall von Selbststeuerung).

(RB-2) Steuerung wirkt mittels (vom Steuerungssubjekt gesetzten) Anreizen, die den Steuerungsobjekten eine Wahl lassen – ihnen also die Möglichkeit eröffnen, sich zwischen verschiedenen Handlungsalternativen zu entscheiden.

Steuerung ist demnach eine gerichtete Beziehung zwischen Steuerungssubjekt und -objekt, die auf strategiefähige Akteure einwirkt, welche eigene Ziele verfolgen und eigenständige Entscheidungen treffen. Das Ziel von Steuerung ist jedoch letztlich nicht die Mikro-Ebene der Akteure; sondern Steuerung ist von der Intention getragen, auf dem Umweg über Verhaltensänderungen der Akteure (messbare) Effekte auf der Systemebene zu erzielen.

2.1.3 Koordination

Die wechselseitige Abstimmung (und gegenseitige Beeinflussung) gleichberechtigter Akteure grenzen wir von Steuerung ab, und zwar im Sinne der folgenden Definition:

(DEF-3) Koordination meint die wechselseitige Abstimmung gleichberechtigter Akteure, die mit dem Ziel betrieben wird, eine für alle Beteiligten tragfähige Problemlösung zu erreichen.

Die Begriffe *Steuerung* und *Koordination* lassen sich zwar begrifflich-analytisch unterscheiden; in der Praxis der Governance sozialer Systeme sind sie jedoch oftmals miteinander verwoben, beispielsweise derart, dass mittels Koordination konsensfähige Lösungen gefunden werden, die dann mittels Steuerung umgesetzt werden.

2.1.4 Mehrebenen-Architektur von Governance

Dies verweist auf die drei Ebenen von Governance: a) die Abstimmungsprozesse in Verhandlungssystemen, b) die Regulierung funktioneller Teilsysteme und c) deren operative Steuerung (sowie die Interdependenzen dieser drei Ebenen). Wir fokussieren hier auf einen Teilbereich, nämlich den operativen Betrieb eines funktionellen Teilsystems. Mayntz und Scharpf definieren funktionelle Teilsysteme – in Abgrenzung von den gesellschaftlichen Teilsystemen Luhmann'scher Provenienz – „als gesellschaftsweit institutionalisierte, funktionsspezifische

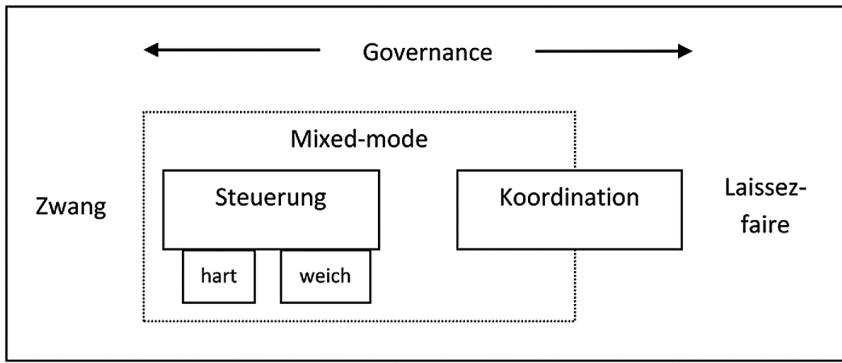
Handlungszusammenhänge“, die „spezialisierte Leistungen“ (Mayntz 1988: 17 f) erbringen. Darunter fassen sie beispielsweise das Gesundheitssystem, das Bildungssystem, aber auch technische Infrastruktursysteme wie beispielsweise den Straßenverkehr (vgl. Mayntz / Scharpf 1995).

2.2 Governance-Modi

In der Governance-Forschung besteht ein gewisser Konsens dahingehend, dass es neuartige Governance-Modi jenseits der klassischen Typen dezentrale Koordination (Markt) und zentrale Steuerung (Hierarchie) gibt. Wie viele derartige Zwischentypen, Mischformen oder Modus-Kombinationen existieren und wie sie konturiert werden können, ist hingegen weniger klar. Oftmals wird auf eine Art „dritten Weg“ verwiesen, der Elemente der klassischen Modi kombiniert, sei es in Form des Netzwerks (Mayntz 1993; Willke 1995), des „mixed scanning“ (Etzioni 1967) oder der losen Kopplung im Sinne von Weick (Grote 2009). Dies sind allesamt Konzepte, die bei aller Unterschiedlichkeit neuartige Governance-Modi jenseits des traditionellen Dualismus von Markt und Hierarchie auszuloten versuchen.

Auch hier wählen wir einen pragmatischen Weg, um das Thema Governance empirisch untersuchen zu können. Wir verwenden folgende Typologie von Governance mit drei ideal-typischen Konstellationen:

Abbildung 1: Typologie von Governance-Modi



Steuerung ist, wie bereits definiert, eine gerichtete Beziehung zwischen Steuerungssubjekt und Steuerungsobjekt, die entweder mit „harten“ Maßnahmen (Verboten) oder mit „weichen“ Maßnahmen (Anreizen) operiert. Es gibt also einen privilegierten Akteur; insofern sprechen wir auch von zentraler bzw. hierarchischer Steuerung. Auch in der Variante der harten Steuerung besteht jedoch ein Misslingens-Risiko, da die gesteuerten Akteure immer die Wahl haben, wie sie mit Verboten umgehen. Dieser Modus grenzt sich also vom *Zwang* ab, der den Steuerungsobjekten keine Wahl lässt.

Koordination – oben definiert als dezentrale Abstimmung gleichrangiger Akteure – unterscheidet sich vom *Laissez-faire* (z.B. auf dem Schwarzmarkt oder in „failed states“) durch ihre institutionelle Einbettung in Regelsysteme (wie beispielsweise das Rechtssystem, das bei Ver sagen selbstorganisierter Koordination aktiv werden kann).

Mixed-mode sind alle dazwischen liegenden Mischtypen, die

- entweder eine intelligente *Kombination* unterschiedlicher Governance-Modi beinhalten (wie beispielsweise mixed-scanning oder Policy-Netzwerke, aber auch Formen der weichen Steuerung)
- oder die Option beinhalten, zwischen verschiedenen Modi zu wechseln („*Switch*“), was nur möglich ist, wenn die betreffende Organisation mehrere Modi beherrscht, und wenn die Mitarbeiter wissen, wann es angebracht ist, den geltenden Regeln zu folgen und wann nicht.

In der Forschung herrscht ein gewisser Konsens, dass moderne Formen der selbstorganisierten Koordination (bottom-up) traditionellen Formen hierarchischer, planwirtschaftlicher Intervention (top-down) überlegen sind (Resnick 1995; Langlois / Robertson 1992; Rifkin 2010). Allerdings gibt es auch Zweifel, ob man sich ausschließlich auf Selbstorganisation verlassen kann oder ob es nicht vielmehr Sinn macht, unterschiedliche Governance-Modi intelligent zu kombinieren (Willke 1995; Surowiecki 2005).

Auf Grundlage der hier skizzierten Debatte haben wir folgende Arbeitshypothesen entwickelt:

- (A1) Im Falle komplexer Systeme ist die dezentrale Koordination der hierarchischen Steuerung überlegen.
- (A2) Im Falle komplexer Systeme ist die weiche Steuerung der harten Steuerung überlegen.

Anhand welcher Indikatoren die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Governance-Modi vermesssen werden kann, bleibt in der Governance-Debatte jedoch offen, so dass wir diese Indikatoren im Folgenden im Rahmen des Simulations-Modells entwickeln müssen.

2.3 Das soziologische Mikro-Makro-Modell

Das Mikro-Makro-Modell, basierend auf dem Modell soziologischer Erklärung (Esser 1999), bildet das Handeln der Akteure auf der Mikro-Ebene sowie die Wechselwirkungen mit den emergenten und sich dynamisch verändernden Systemzuständen auf der Makro-Ebene ab. Es enthält, über Esser hinausgehend, zudem Ansatzpunkte für Interventionen, die – je nach gewähltem Governance-Modus – unterschiedlich konfiguriert werden können. Das Modell enthält folgende Komponenten:

2.3.1 Akteure

Auf der Mikro-Ebene befindet sich eine Vielzahl heterogener, strategiefähiger Akteure, die individuelle Ziele verfolgen und regelbasiert miteinander interagieren. Für die formale Beschreibung der Handlungswahlen (Logik der Selektion) verwenden wir das SEU-Modell, demzufolge die Akteure im Rahmen der situativ wahrgenommenen Opportunitäten die Handlungsalternative selegieren, die ihren subjektiven Erwartungsnutzen („*subjective expected utility*“) maximiert. Für die Modellierung der Logik der Situation ziehen wir zudem das Modell der Frame-Selektion (MFS, vgl. Kroneberg 2005, 2007) hinzu, das es ermöglicht, automatisch-spontane Reaktionen in den Prozess der Handlungswahl einfließen zu lassen, und dennoch eine reflexiv-kalkulierende Handlungswahl zu modellieren. Es erlaubt somit, sowohl die im System geltenden Regeln als auch die Entscheidungsspielräume der Akteure bei der Modellierung von Handlungswahlen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.4).

2.3.2 System

Die Makro-Ebene des Systems strukturiert die Aktionen der Akteure, und zwar im doppelten Sinne: als Einschränkung (constraint), aber auch als Möglichkeitsraum. Im Fall eines funktionellen Teilsystems wie des Straßenverkehrs stehen den Akteuren beispielsweise nur die vorhandenen Straßen zur Verfügung (infrastrukturelle „constraints“) – aber auch nur dann, wenn dort kein Verkehrsstaubestehen (situationale „constraints“, die sich als emergentes Resultat der Interaktionen ergeben). Diese Struktur bietet den Akteuren also einerseits Optionen für Entscheidungen (auch in Form der Interaktion mit anderen Akteuren), die ihnen ansonsten nicht zur Verfügung ständen. Zugleich sind die Akteure jedoch in ihren Handlungswahlen durch die sich eröffnenden Möglichkeiten eingeschränkt.

2.3.3 Wechselwirkungen Mikro-Makro

Das Modell enthält Regeln für die Interaktion der Akteure mit ihrer sozialen (aber auch ihrer infrastrukturellen) Umwelt, und zwar in zweierlei Weise: Es definiert, in welcher Weise die Akteure die Umwelt wahrnehmen (Logik der Situation); und es enthält Mechanismen, wie die Akteure die Umwelt verändern. Dadurch, dass alle Akteure auf einer gemeinsamen Umwelt agieren und interagieren, können die Einzelaktionen sämtlicher Akteure zu System-Zuständen aggregiert werden, welche sich im zeitlichen Verlauf dynamisch verändern können. Diese Mikro-Makro-Transformation entspricht der Esser'schen „Logik der Aggregation“ – wobei die Methode der Computersimulation hilft, die Transformationsregeln abzubilden (vgl. Abschnitt 3.1).

2.3.4 Governance

Über Esser hinausgehend, enthält das Modell zudem Ansatzpunkte für Interventionen auf der Systemebene, mit deren Hilfe die Situation verändert und so das Verhalten der Akteure beeinflusst werden kann. Dies setzt Ziele auf der Systemebene voraus wie beispielsweise die Aufrechterhaltung der Systemstabilität (Stichwort: Stauvermeidung im Straßenverkehr) oder die Veränderung des Systems (Stichwort: Energiewende). Daher stehen unterschiedliche Governance-Modi zur Verfügung, um die Intensität derartiger Interventionen in Anlehnung an soziologische Konzepte wie zentrale Steuerung oder dezentrale Koordination konfigurieren zu können.

2.3.5 Indikatoren

Zudem verfügt das Modell über Messfühler zur Diagnose des aktuellen Systemzustandes, welcher sich aus den aggregierten Handlungen der Akteure ergibt. Darüber hinaus gibt es Mikro-Indikatoren, welche die Erreichung der individuellen Ziele der Akteure messen, sowie Makro-Indikatoren, mit deren Hilfe die Erreichung bzw. Nicht-Erreichung der Ziele auf der Systemebene vermessen werden kann.

Die Leistungsfähigkeit der Governance-Modi soll also sowohl anhand von Makro-Indikatoren, welche die Effizienz von Governance auf der Systemebene anzeigen, als auch anhand von Mikro-Indikatoren überprüft werden, die den Grad der Zielerreichung auf Seiten der Akteure messen. Denn es ist nicht unwahrscheinlich, dass es zu Zielkonflikten kommt, wenn beispielsweise ein steuernder Eingriff, dessen Ziel es ist, das System zu stabilisieren, einen Teil der Akteure daran hindert, ihre individuellen Ziele zu erreichen – oder umgekehrt.

3. SUMO-S – Eine soziologische Verkehrs-Simulation

Das von uns entwickelte Verkehrs-Simulationsframework SUMO-S (wobei S für soziologisch steht) unterscheidet sich von der Basisversion SUMO¹ durch die softwaretechnische Umsetzung der in Abschnitt 2 entwickelten theoretischen Konzepte. Dies umfasst insbesondere die mikrosoziologisch fundierte Handlungslogik der Agenten, die dynamische Veränderung des Systemzustandes sowie die Möglichkeit steuernder Eingriffe – je nach Governance-Modus in unterschiedlicher Intensität. Im Folgenden werden sämtliche Komponenten von SUMO-S detailliert dargestellt, allerdings unter Verzicht auf eine Reproduktion des Quellcodes der Software.

3.1 Agentenbasierte Modellierung und Simulation

Die Methode der Computersimulation bietet sich als ein Ansatzpunkt zur Untersuchung komplexer Systeme an. Agentenbasierte Simulationsmodelle sind in der Lage, eine Vielzahl eigenständig handelnder Agenten gleichzeitig zu simulieren (vgl. Schneider / Bauer 2009: 44ff; Kron 2010: 218ff). Zudem lassen sich, worauf Esser schon 1991 hingewiesen hat, mit Hilfe dieser Methode Prozesse der Aggregation empirisch untersuchen, was mit kaum einer anderen soziologischen Methode möglich ist (Esser 1991: 41; vgl. Weyer et al. 2011).

Die agentenbasierte Modellierung und Simulation (ABMS) sozialer Systeme greift Ideen auf, die Schelling (1969) erstmals im Rahmen seines Segregationsmodells entwickelt hatte. Sie stellt ihre Vorteile besonders dann unter Beweis, wenn die Interaktionen heterogener Agenten komplex und nichtlinear sind und so emergente Effekte entstehen können, die sich nicht mit einfachen Flussmodellen oder Systemen rekonstruieren lassen, welche durch Differentialgleichungen beschrieben werden (Bonabeau 2002: 51).

Die Methode der Computersimulation erlaubt, die Wechselwirkungen zwischen der Mikro- und der Makro-Ebene eines sozialen Systems experimentell zu untersuchen (Kron 2010: 218ff). Sie ermöglicht eine dynamische Modellierung sozialer Systeme, deren Veränderungen im Zeitablauf damit beobachtbar werden; und sie eignet sich insbesondere zur Implementation soziologischer Theorien wie des Esser'schen Modells soziologischer Erklärung (MSE, vgl. Esser 1991, 1993, 1999), das mit der Logik der Situation, der Logik der Selektion (und dem darin enthaltenen SEU-Modell) sowie der Logik der Aggregation drei Teilelemente enthält, die im theoretischen Modell bereits stark formalisiert sind.

Die Methode einer handlungstheoretisch fundierten, agentenbasierten Modellierung und Simulation sozialer Systeme (vgl. Fink / Weyer 2011) eignet sich also, um Handlungswahlen einer großen Anzahl heterogener Akteure abzubilden. Wir vermuten daher, dass sie sich auch zur Untersuchung von Governance-Themen eignet und somit dazu beitragen könnte, offene Fragen der Governance-Forschung, insbesondere die nach der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Modi, zu beantworten.

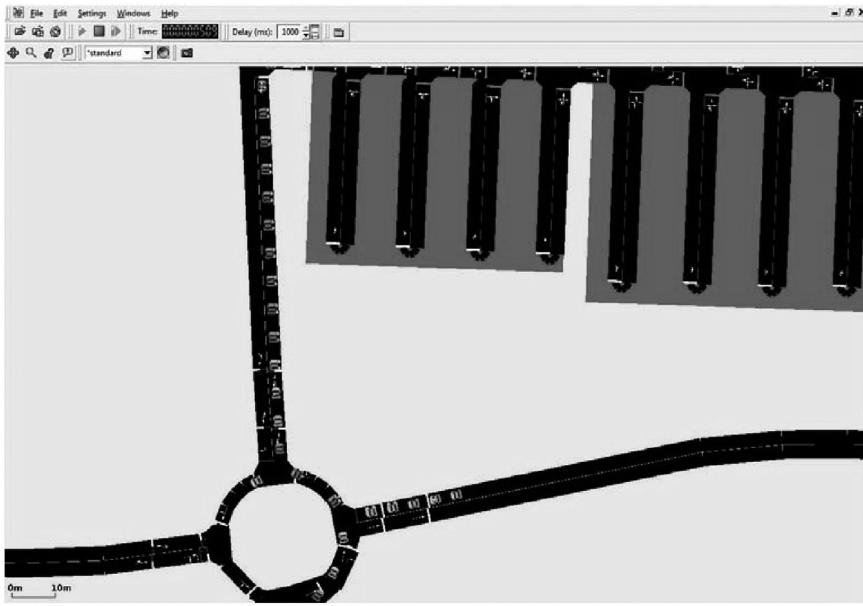
3.2 Konzeption des Simulationsframeworks

SUMO-S wurde entwickelt, um die Strukturen und Prozesse in einem funktionellen Teilsystem (im Sinne von Mayntz / Scharpf, s.o.) zu untersuchen, und zwar am Beispiel der Verkehrssteuerung rund um den Signal Iduna Park (das ehemalige Westfalenstadion) in Dortmund. Die Verkehrsbetriebe der Stadt Dortmund haben dort einen Leitstand aufgebaut, in dem die Daten aus Messschleifen und ferngesteuerten Kameras zusammenfließen. Zudem kann der Verkehr

¹ SUMO (Simulation of Urban Mobility) wird am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt (SUMO 2010).

großräumig mithilfe unterschiedlicher Techniken (Hinweistafeln, Straßensperrungen etc.) gesteuert werden.

Abbildung 2: SUMO-S Screenshot (Ausschnitt): Kreisverkehr und Parkplatz (blau hinterlegt)



Die Mitarbeiter der Verkehrsbetriebe, die wir bei ihrer Arbeit beobachten und mit denen wir Interviews führen konnten, haben im Laufe der letzten Jahre beträchtliche Erfahrungen im Umgang mit diesem System gesammelt, so dass es in Dortmund während der Frauenfußball-Weltmeisterschaft im Jahr 2011 nicht zu dem Chaos kam wie rund um das Stadion in Mönchengladbach, wo bis dato noch keine Verkehrssteuerung implementiert war.

Das globale Ziel, das die Verkehrsbetriebe mit diesem System verfolgen, besteht darin, dass alle per Pkw anreisenden Zuschauer eine Route zu einem der Parkplätze wählen, die es ermöglicht, dass sie rechtzeitig zum Anpfiff des Fußballspiels im Stadion sind.

Das individuelle Ziel eines jedes Verkehrsteilnehmers besteht darin, auf seinen Wunschkparkplatz zu gelangen, von dem aus er das Stadion möglichst optimal erreichen kann (bzw. nach Spielende möglichst rasch abreisen kann). Dieser Wunsch ist bei einheimischen Fans aufgrund der Ortskenntnis naturgemäß stärker ausgeprägt als bei Fans, die von auswärts anreisen.

Aus den Interviews, die wir mit den Mitarbeitern des Leitstands geführt haben, wurde zudem deutlich, dass es Sinn macht, unterschiedliche Fahrertypen zu implementieren, die auf steuernde Impulse unterschiedlich reagieren (vom konsequenten Befolgen bis hin zum beharrlichen Ignorieren). Das Simulationsframework sollte möglichst viele dieser Facetten abbilden.

3.2.1 SUMO und SUMO-S

Das Verkehrssimulations-Framework SUMO bildet die technische Basis von SUMO-S und enthält viele der für die Modellierung benötigten Grundlagen. Diese umfassen insbesondere die Infrastruktur, ein *physikalisches* Fahrzeugfolgemodell für die Agenten, Messschleifen sowie die (für unsere Zwecke erweiterte) Möglichkeit, skriptgesteuert in die Simulation einzutreten und bspw. einzelne Objekte zu verändern. Das rein physikalisch begründete Fahrverhalten der Agenten basiert auf dem mikroskopischen Fahrzeugfolgemodell von Krauß, welches auf der Annahme beruht, dass „Fahrzeuge sich in der Regel kollisionsfrei bewegen“ (Krauß 1998).

Für das *soziologische* Fahrermodell in SUMO-S mussten wir die Routenwahl der Agenten modellieren, wobei wir auf das Modell soziologischer Erklärung (MSE, Esser 1999) sowie das Modell der Frame-Selektion (MFS, Kroneberg 2005) zurückgegriffen haben. Beide Modelle sind für diesen Zweck gut geeignet, da sie es ermöglichen, unterschiedliche Präferenzen der Agenten sowie variable Umgebungsbedingungen zu integrieren. Zudem sind sie parametrierbar, d.h. mit ihrer Hilfe lassen sich beispielsweise unterschiedliche Fahrertypen modellieren.

Aufgabe der Agenten (Fahrer) ist es, einen ihren individuellen Präferenzen entsprechenden Parkplatz anzusteuern. Sie orientieren sich dabei an der aktuellen Verkehrslage sowie an Routen-Empfehlungen bzw. Straßensperrungen (vgl. Abschnitt 3.3). Die eigentliche Fahraufgabe (Spurhalten, Geschwindigkeit regulieren) wird in unserem Framework von allen Agenten gleich erledigt.

Insgesamt wurden pro Versuchslauf jeweils ca. 6750 Fahrzeuge modelliert, die zeitlich gestaffelt in das Straßensystem einfahren und einen Parkplatz aufzusuchen (vgl. ausführlich Kronger / Lücke² 2010).

Schließlich mussten die Instrumente zur *Systemsteuerung* modelliert und als Erweiterung von SUMO implementiert werden.

3.2.2 Interventions-Techniken

Als Eingriffsmöglichkeiten stehen den Systemsteuerern zwei Systeme zur Verfügung:

- das Verkehrsleitsystem (VLS), welches rechtlich bindende Informationen wie Straßensperrungen kommuniziert, und zwar per Beschilderung und ggf. Beschränkung;
- das Parkleitsystem (PLS), welches lediglich Empfehlungen für die Routenwahl anzeigt. Es ist damit möglich, Fahrern mit dem Ziel „Stadion“ eine andere Route zu empfehlen als Fahrern mit dem Ziel „Westfallenhallen“.

3.2.3 Messfühler

Angelehnt an das Realsystem stehen auch im hier untersuchten Szenario Messwerte von Induktionsschleifen zur Verfügung, die an unterschiedlichen Stellen installiert sind. Dabei wurde als Kriterium die aktuell gefahrene Durchschnitts-Geschwindigkeit genutzt. Wenn diese zu stark absinkt, kann von einem Stau ausgegangen werden. Daneben stehen für alle Parkplätze die genauen Füllstände zur Verfügung. Die in den Versuchsläufen erhobenen Werte der Induktionsschleifen werden später auch in der Auswertung genutzt.

2 Der Geburtsname von Fabian Adelt ist Lücke.

3.2.4 Das Problem der Verallgemeinerbarkeit

Die Methode der Computersimulation arbeitet immer mit konkreten Szenarien und steht damit vor dem Problem der Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse sowie deren Übertragbarkeit auf andere Bereiche. Ein Vorteil unseres Ansatzes besteht darin, dass wir in den Szenarien mit Daten (z.B. von Messschleifen) arbeiten konnten, die uns die Stadt Dortmund freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat. Auf diese Weise war es möglich, ein Modell zu entwickeln, das nahe an der Realität ist, das also die Praxis von Governance in einem funktionellen Teilsystem widerspiegelt. Die Alternative zu diesem Verfahren wären abstrakte Szenarien und Modelle, die theoriegestützt entwickelt werden, dann aber den Beweis führen müssten, dass ihre Annahmen realistisch sind.

3.3 Governance-Modi in der Praxis

Die in Abschnitt 2.2 definierten Governance-Modi lassen sich nun auf den konkreten Fall projizieren. In der Praxis findet man vor allem folgende drei Modi:

3.3.1 Dezentrale Koordination (KOOR)

Die Verkehrszentrale greift nicht ein, sondern beschränkt sich auf eine Beobachterrolle. Die Pkw-Fahrer lösen ihre Aufgabe, den Wunschparkplatz zu finden, durch lokale Optimierung und Koordination mit anderen Verkehrsteilnehmern. Im ungünstigsten Fall fahren sie nacheinander eine Reihe bereits voller Parkplätze an, da keinerlei Informationen über den Grad der Belegung zur Verfügung stehen.

3.3.2 Weiche Steuerung (STRG_W)

Die Verkehrszentrale setzt das Parkleitsystem (PLS) ein und empfiehlt Routen, auf denen sich freie Parkplätze erreichen lassen. Sie setzt damit Anreize, denen die Fahrer folgen können, aber nicht müssen. Die Zentrale weiß jedoch nicht, ob diese Routen auch den Wünschen der jeweiligen Fahrer entsprechen; denn sie hat diesbezüglich keinerlei Informationen und bekommt auch kein Feedback. Dieser Modus ist insofern interessant, als der Steuerer nicht wissen kann, ob seine Eingriffe Wirkung zeigen, weil es der Entscheidung jedes individuellen Agenten obliegt, den Empfehlungen zu folgen oder nicht (was unter anderem vom Fahrertyp abhängt, s.u.). Denn in die Handlungswahl jedes einzelnen Agenten gehen unterschiedliche Faktoren ein, unter anderem die lokal verfügbaren Informationen, die globalen, von der Systemzentrale zur Verfügung gestellten Informationen sowie die eigenen Ziele und Präferenzen.

3.3.3 Harte Steuerung (STRG_H)

Das Verkehrsleitsystem (VLS) ermöglicht direktere Eingriffe, z.B. mithilfe von Straßensper rungen, die nicht nur physische Barrieren darstellen, sondern auch rechtlich bindenden Charakter haben. Doch auch dieser Fall ist steuerungstheoretisch interessant, weil den Fahrern in den meisten Fällen dennoch Wahlmöglichkeiten bleiben. Sie sind in ihrer Routenwahl zwar eingeschränkt, müssen aber dennoch Entscheidungen fällen, welche Route sie anstelle der gesperrten wählen. Hier kann z.B. das Parkleitsystem eine Entscheidungshilfe bieten.

Die oben beschriebenen Modi spezifizieren jeweils die *maximal* verfügbare Eingriffstiefe aus Sicht des Systemsteuerers, die es ihm ermöglicht, die verfügbaren Modi flexibel einzulegen.

setzen, also ggf. auch weniger hart einzugreifen, als der gewählte Modus es zulassen würde. Der Verkehrszentrale stehen immer mehrere Optionen zur Verfügung; und sie kann bei Bedarf zwischen verschiedenen Modi hin- und herschalten („*Switch*“).

Der Modus der harten Steuerung (STRG_H) impliziert beispielsweise, dass das System phasenweise auch in einem anderen Modus, z.B. der weichen Steuerung (STRG_W), operieren kann, aber auch, dass der stärkere Durchgriff nur partiell wirksam wird, beispielsweise nur an neuralgischen Punkten des Systems, nicht aber im gesamten Streckennetz.

Bei der Modellierung haben wir daher die verschiedenen Modi über die maximal mögliche Eingriffstiefe definiert, um sie (künstlich) zu isolieren und unter kontrollierten Laborbedingungen zu testen, auch wenn die anderen verfügbaren Modi im Hintergrund mitlaufen und das Ergebnis teilweise beeinflussen.

3.4 Implementation des Modells der Frame-Selektion

Das Modell der Frame-Selektion (MFS) unterscheidet die drei Selektionsschritte Frame-, Skript- und Handlungsselektion. Ein Frame umfasst die Deutung von spezifischen Situationsmerkmalen, ein Skript einen rezeptähnlichen Problemlösungsansatz für den gewählten Frame und eine Handlung den konkreten Vollzug wirksamen Verhaltens (Kroneberg 2005). Das MFS als modulierbare Handlungstheorie präzisiert die Logiken der Situation und der Selektion des Modells soziologischer Erklärung (MSE). Es trägt der Tatsache Rechnung, dass nicht in jeder Situation ein rationaler Prozess der Handlungswahl vollzogen wird. Dies gilt insbesondere, wenn die Situation eine hinlänglich bekannte Struktur hat (z.B. Frame „Ampel rot“) und unmittelbar ein bewährtes Muster der Handlungswahl (z.B. Skript „anhalten“) verfügbar ist, das die Aktion „bremsen“ zwangsläufig nach sich zieht. In diesem Beispiel wurde für alle drei Entscheidungsschritte der „automatisch-spontane“ Modus genutzt, der immer dann zum Tragen kommt, wenn die Situationsmerkmale stark genug sind. In unklaren oder unbekannten Situationen (wie z.B. einer uneindeutigen Vorfahrtssituation) wechselt der Akteur dagegen in den „rational-kalkulierenden“ Modus, für welchen wir die Wert-Erwartungstheorie hinzuziehen, also SEU-Kalkulationen durchführen.

Für eine soziologische Erklärung sind Frames und Skripte insofern von großer Bedeutung, als sie subjektive Interpretationen der Situation beinhalten und somit Ansatzpunkte für Steuerung darstellen – ein Aspekt, auf den hier allerdings nicht näher eingegangen werden kann.³

Wir haben für unsere Implementation folgende Frames definiert (ausführlich inkl. aller Selektionsgewichte Kroniger / Lücke 2010: 72ff.) und zudem festgelegt, dass eine implizite Hierarchie der Situationsmerkmale dazu führt, dass stets der Frame mit dem kleinstmöglichen Index gewählt wird. So würde etwa das Situationsmerkmal „Straßensperrung“ durch das Verkehrsleitsystem andere Situationsmerkmale, bspw. zu überfüllten Parkplätzen stets „überdecken“ und dazu führen, dass F_0 (und nicht etwa F_2) gilt. Somit gilt folgende Hierarchie der Situationsmerkmale samt zugehöriger Frames:

- F_0 Verkehrsleitsystem: Ein Schild des Verkehrsleitsystems ist auf der aktuell befahrenen Straße geschaltet.
- F_1 Parkleitsystem: Eine Routenempfehlung durch das Parkleitsystem ist auf der aktuell befahrenen Straße geschaltet.
- F_2 Parkplatz voll: Der Fahrer erhält Kenntnis, dass der von ihm angestrebte Parkplatz voll ist.

3 Unseres Wissens handelt es sich um den ersten Versuch, das MFS softwaretechnisch zu implementieren und für experimentelle Zwecke zu nutzen. Ob es möglich ist, die Handlungswahlen von Agenten mit soziologisch weniger anspruchsvollen Konzepten zu modellieren und zu simulieren (z.B. mit Hilfe von KISS-Modellen), kann an dieser Stelle leider nicht geklärt werden.

- F_3 Stau: Der Fahrer fährt seit mehr als 120 sec mit sehr langsamer Geschwindigkeit.
- F_4 Normales Fahren: Solange keiner der anderen Frames gewählt wird, bleibt der Fahrer im Frame F_4 , d.h. er führt nur die normale Fahraufgabe aus, was durch das oben erwähnte physikalische Fahrermodell modelliert wird.

Da die Situationsmerkmale der oben definierten Frames eindeutig sind und wir vereinfachend davon ausgehen, dass sie von allen Fahrern fehlerfrei wahrgenommen werden, unterscheiden sich die Fahrertypen in der Frame-Wahl nicht. Darüber hinaus wählen alle Fahrer den Frame im automatisch-spontanen Modus.

In der nachfolgenden Skript-Selektion gibt es zwei Möglichkeiten auf vorstrukturierte Bündel von Aktionen bzw. Handlungsprogramme zurückzugreifen (falls diese dem Fahrer zur Verfügung stehen). Auch diese Entscheidung treffen alle Fahrertypen gleichsam im automatisch-spontanen Modus, da wir die jeweilige Reaktion auf die begrenzte Menge von Situationsmerkmale als fest angesehen haben.

- S_0 Route überdenken: Der Fahrer überdenkt die Route, falls er auf dieses Skript zurückgreifen kann (z.B. wenn er es gewohnt ist Hinweise des PLS zu befolgen oder wenn er damit gute Erfahrungen gemacht hat).
- S_1 Route nicht überdenken: Der Fahrer bleibt bei seiner Routenwahl, falls er auf ein Skript zurückgreifen kann, das sich in ähnlichen Situationen bewährt hat.

Die Skript-Wahl ist sowohl vom Fahrertyp als auch vom gültigen Frame abhängig: Während alle Fahrer auf rechtlich bindende Informationen (F_0) mit Skript S_0 reagieren, unterscheiden sich bspw. der Sturkopf (S_1) und der Folgsame (S_0) in der Skriptwahl, wenn vorher Frame F_1 gewählt wurde. Nach Wahl von F_4 kann unabhängig vom Fahrertyp logischerweise nur S_1 selegiert werden.

In der abschließenden Selektion einer Aktion stehen die folgenden Möglichkeiten zur Auswahl. Je nach Güte und Passung des geltenden Skripts wird in diesem Schritt automatisch-spontan (as) oder reflexiv-kalkulierend (rc) gehandelt. Während im as-Modus nur die Alternativen A_0 und A_1 zur Verfügung stehen, kann der Akteur im rc-Modus aus allen vier Aktionen selegieren:

- A_0 Route beibehalten (Diese Aktion wird automatisch gewählt, wenn Skript S_1 gewählt wurde).
- A_1 Durch VLS oder PLS vorgegebene Route nutzen.
- A_2 In Abwägung aller verfügbarer Informationen eigener neuer Route zum aktuell gewählten Parkplatz folgen.
- A_3 In Abwägung aller verfügbarer Informationen eigener neuer Route zu neuem Parkplatz folgen.

Die Implementation des MFS im Rahmen einer Verkehrssimulation setzt somit das von Kroeneberg (2009: 240ff) für Handlungstheorien geforderte und im MFS zentral vorgesehene „Modulierbarkeitskriterium“ um, indem für die drei Selektionsschritte unterschiedliche Präzisionsgrade gewählt werden: Während die Frame-Selektion typübergreifend und sehr einfach angelegt ist, erfolgt die Skript-Selektion je nach Akteurstyp. Die Handlungswahl schließlich zeigt sich als der umfassendste der drei Selektionsschritte, der ggf. auch eine rational-kalkulierende Entscheidung modelliert mittels SEU-Kalkulation, umfasst.

3.5 Fahrertypen

In Anlehnung an das MFS-/SEU-Konzept geht das soziologische Fahrermodell davon aus, dass Handlungswahlen gemäß individueller Präferenzen getroffen werden, gegebenenfalls auch automatisch-spontan. Die Individualität der Agenten lässt sich somit entweder durch Randomisierung ihrer Eigenschaften (vgl. Epstein / Axtell 1996) oder durch eine Definition von Typen erzeugen. Die U-Werte (für die Wertigkeit von Zielen) und p-Werte (für die Wahr-

scheinlichkeit der Erreichung von Zielen mittels bestimmter Aktionen), welche die Basis für SEU-Kalkulationen im Rahmen der Handlungsselektion bilden, können entweder vom Experimentator vorgegeben (Fink / Weyer 2011) oder durch Befragungen erhoben werden, um das Modell auf diese Weise mit Realdaten zu kalibrieren (Winkler 2011). Dies gilt gleichsam für die weiteren Parameter, die für die beiden vorangehenden Schritte im MFS, und auch für automatisch-spontane Wahlen, spezifiziert werden müssen.

Wir haben uns im vorliegenden Fall für eine Art Mittelweg entschieden, nämlich uns auf die Einschätzungen der Mitarbeiter des Leitstandes zu verlassen, die mehrere Fahrertypen definiert haben, welche auf unterschiedliche Art und Weise auf externe Vorgaben reagieren (vgl. Kroniger / Lücke 2010: 208ff). Diese konkreten Fahrertypen korrespondieren in gewisser Weise mit einigen der Schimank'schen Akteurmodelle (2000: 19ff; vgl. Kron 2010: 17ff). Die Charakteristika der Fahrertypen haben wir in folgende Modellparameter übersetzt:

3.5.1 *Der Folgsame* (F_P)

Der Folgsame nutzt nach Möglichkeit alle ihm zur Verfügung stehenden Informationen, um ohne eigene Anstrengung eine gute Route zu finden. Dabei verlässt er sich besonders auf die durch Park- und Verkehrsleitsystem vermittelten Hinweise. Ein Stau ist für ihn kein Grund, die aktuelle Route zu ändern. In der Realität verhalten sich vor allem ortsfremde Fahrer mit geringen bis gar keinen Ortskenntnissen auf diese Art und Weise. (Der Folgsame entspricht in etwa dem Akteurmodell des normbefolgenden Homo sociologicus.)

3.5.2 *Der Denker* (F_D)

Der Denker trifft seine Routenwahl strategisch kalkulierend, verlässt sich dabei jedoch nur auf Informationen, die er selbst aus dem Verkehrsbild gewonnen hat. Somit ignoriert er die Empfehlungen des Parkleitsystems und reagiert nur auf Staus und Straßensperrungen. (Der Denker entspricht in etwa dem Akteurmodell des nutzenmaximierenden Homo oeconomicus, was ebenfalls auf den folgsamen Denker zutrifft.)

3.5.3 *Der folgsame Denker* (F_{FD})

Im Gegensatz dazu versucht der folgsame Denker, alle ihm zur Verfügung stehenden Informationen in seine Routenkalkulation einfließen zu lassen.

3.5.4 *Der Sturkopf* (F_S)

Der Sturkopf bildet einen Fahrertyp ab, welcher die Gegebenheiten vor Ort gut kennt und bereits im Vorhinein weiß, über welche Route er einen bestimmten Parkplatz ansteuern möchte. Von diesem Plan lässt er sich nur durch Straßensperrungen (oder einen bereits vollen Parkplatz) abhalten. (Der Sturkopf lässt sich mit Hilfe der Schimank'schen Akteurmodelle am schlechtesten fassen; am ehesten treffen auf ihn einige Charakteristika des Identitätsbehaupters zu. Er agiert zudem wie ein Homo oeconomicus, der jedoch – im Gegensatz zu den beiden Denker-Typen – stets im vorab gewählten Frame bleibt. Später bezeichnen wir ihn – ein wenig verkürzt – als rationalen Egoisten.)

Aus Gründen der Modell-Vereinfachung unterstellen wir reine Typen und gehen davon aus, dass die Agenten weder im Laufe einer Simulation den Typ wechseln noch Elemente unterschiedlicher Typen kombinieren, wie das beispielsweise beim „emotional man“ der Fall ist, den Schimank eher als eine zusätzliche Option des *homo oeconomicus* bzw. *sociologicus* denn als einen dauerhaften Typus charakterisiert (vgl. Kron 2010: 23).

Die von uns identifizierten unterschiedlichen Fahrertypen sind insofern von Relevanz, als der Erfolg von Governance, wie sich später zeigen wird, nicht ausschließlich vom gewählten Modus abhängt, sondern auch vom Mischungsverhältnis der Fahrertypen. Es wäre ja auch unrealistisch, eine homogene Fahrer-Population zu unterstellen. Zudem machen es die oben angestellten Überlegungen zur Wechselwirkung von Mikro- und Makro-Ebene plausibel, verschiedene Agententypen zu konstruieren, um so emergente Effekte unterschiedlicher Konfigurationen untersuchen zu können – und zwar unterschiedlicher Konfigurationen nicht nur auf der Ebene von Governance, sondern auch auf der Ebene der Agenten (Fahrer).

3.6 Fahrer-Mischverhältnisse

In den Experimenten werden verschiedene Mischungsverhältnisse der vier idealisierten Fahrertypen betrachtet; ausgehend von einer realitätsnahen Mischung (Mix_1) lassen sich sowohl folgsamere (Mix_2) als auch sturere (Mix_3) Populationen abbilden. Zusätzlich wird der hypothetische Fall untersucht, dass ausschließlich folgsame Fahrer im Spiel sind (Mix_0). Die Anzahl der beiden Denker-Typen (F_D und F_{FD}) wurde in allen Versuchsläufen konstant gehalten, um nicht zu viele Variablen zu verändern. Die Heterogenität der Agentenpopulation ergibt sich in unserem Modell aus der Mischung unterschiedlicher Agententypen und nicht aus der Individualität singulärer Agenten, die ihren Typus frei gestalten und variieren können. Somit ergeben sich die folgenden Fahrer-Mischverhältnisse:

- Mix_0 ausschließlich folgsame Fahrer.
- Mix_1 realitätsnahe Mischung, basierend auf den Angaben der Leitstand-Mitarbeiter (Sturkopf 47%; Denker 29%; Folgsame 13%; folgsame Denker 11%).
- Mix_2 mehr Folgsame als in Mix_1 (folgsame Denker 39%; Folgsame 32%; Sturkopf 19%; Denker 10%); diese Mischung enthält einen größeren Anteil Fahrer, die den Empfehlungen folgen.
- Mix_3 mehr Sturköpfe als in Mix_1 (Sturköpfe 60%; Denker 20%; andere jeweils 10%); diese Gruppe ist schwerer von außen zu beeinflussen.

3.7 Erfolgskriterien von Governance

Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, enthält die Fachliteratur kaum konkrete Hinweise auf Kriterien, mit deren Hilfe man den Erfolg von Governance vermessen sowie die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Modi vergleichen könnte. Wir verwenden daher die folgenden Indikatoren auf der Makro- und auf der Mikro-Ebene.

3.7.1 Systemziele (Makro-Ebene)

Als globales Systemziel lässt sich – auf Basis der Interviews, die wir geführt haben – das möglichst gute Funktionieren des Systems, also der möglichst reibungslose Verkehrsfluss zum (bzw. vom) Stadion, definieren.

Als Global-Indikator für die Leistungsfähigkeit des Systems soll daher erstens die Zeit t dienen, die benötigt wird, bis alle Fahrzeuge einen Parkplatz erreicht haben, und zweitens die Durchschnittsgeschwindigkeit v aller Fahrzeuge während eines Versuchslaufs. Auf diese Wei-

se wollen wir Anhaltspunkte gewinnen, um unterschiedliche Governance-Modi miteinander zu vergleichen.

Ein dritter Indikator ergibt sich aus folgender Überlegung: Aus Sicht der Steuerer ist es optimal, wenn das System sich über einen längeren Zeitraum in einem einigermaßen stabilen Zustand befindet, wenn also allzu starke Schwankungen (wie Staus, Stop-and-go-Verkehr etc.) vermieden werden können.

Wir verwenden daher Staus an neuralgischen Punkten des Straßennetzes als Indikator für Systemstabilität und messen dies anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge auf dem betreffenden Streckenabschnitt. Wir postulieren, dass die Performance des Systems umso besser ist, je weniger die Durchschnittsgeschwindigkeit (auf neuralgischen Streckenabschnitten) schwankt. Schwankt die Durchschnittsgeschwindigkeit stark, ist das Gesamtsystem gleichsam „aus dem Takt geraten“, während eine gleichförmige Durchschnittsgeschwindigkeit auf ein intaktes System schließen lässt. Und je höher diese ist, umso besser funktioniert das gesamte System. Zur Operationalisierung der Systemstabilität verwenden wir daher die folgende Formel, in der die Schwankungen der Durchschnittsgeschwindigkeit auf einzelnen, neuralgischen Streckenabschnitten zu der globalen Variable S aggregiert werden:

Abbildung 3: Maßzahl S für Systemstabilität

$$S = 100 \cdot \frac{1}{T-1} \cdot \sum_{t=2}^T \left(\text{abs} \left(\log \left(\frac{\bar{v}_t}{\bar{v}_{t-1}} \right) \right) \right)$$

Die Maßzahl S setzt, gemittelt über die gesamte Simulationsdauer T (in Minuten), die Durchschnittsgeschwindigkeit (v_t) im Zeitfenster t ins Verhältnis zu denjenigen in der vergangenen Minute (v_{t-1}). Da bei Betrachtung dieses Quotienten jedoch die Werte für eine Geschwindigkeitsverdopplung (2) bzw. eine Geschwindigkeitshalbierung (0,5) unterschiedlich „weit“ von konstanter Geschwindigkeit (1) entfernt sind, logarithmieren wir die Ergebnisse, wodurch die beiden genannten Fälle mit den Werten -0,301 und 0,301 jeweils gleich weit vom Idealfall (0) entfernt sind.

Tabelle 1: Vergleich logarithmischer Berechnungen

	$\frac{\bar{v}_t}{\bar{v}_{t-1}}$	$\left(\log \left(\frac{\bar{v}_t}{\bar{v}_{t-1}} \right) \right)$	$\text{abs} \left(\log \left(\frac{\bar{v}_t}{\bar{v}_{t-1}} \right) \right)$
Verdopplung	2	-0,301	0,301
Halbierung	0,5	0,301	0,301
Keine Änderung	1	0	0

Der Absolutbetrag abs schließlich entfernt die Vorzeichen – denn sonst würden sich bei der Mittelwertbildung gleichförmige Schwankungen nach oben und unten gegenseitig eliminieren, der Faktor würde also nicht das Gewünschte abbilden. Ein niedriger Wert für S steht somit für eine bessere System-Performance.

Die Maßzahl S ist jedoch gleichgültig gegenüber der Geschwindigkeit; ein kontinuierlich und gleichmäßig, aber sehr langsam sich bewegender Verkehr würde gleich gut bewertet wie ein flüssiger und zügiger Verkehr. Daher haben wir zusätzlich eine Maßzahl P für die Systemperformance gebildet, die als gewichtete Summe der beiden Teilmaßzahlen Durchschnitts-

geschwindigkeit v und Maßzahl S berechnet wird, die auf die jeweiligen Maximalwerte v_{\max} und S_{\max} aller Versuchsläufe normiert wurden:

Abbildung 4: Maßzahl P für Systemperformance

$$P = \left(1 - \frac{S}{S_{\max}} \right) \cdot 0,5 + \frac{v}{v_{\max}} \cdot 0,5$$

3.7.2 Akteurziele (Mikro-Ebene)

Die Konzeption von Governance, die wir verwenden, unterstellt gewisse Freiheitsgrade der Akteure bei der Handlungswahl (vgl. Abschnitt 2.1). Diese haben somit auch ein eigenständiges Interesse an der Zielerreichung (z.B. auf ihrem Wunschparkplatz zu landen) – was zu Konflikten zwischen Akteur- und Systemzielen und somit zu unvorhersehbarem Systemverhalten führen kann.

Anstatt den aufwändigen Weg zu gehen, die realen Ziele und Präferenzen der Akteure zu erheben, haben wir uns auch hier auf die Einschätzung der Leitstand-Mitarbeiter verlassen. Unsere Experimente basieren auf der – empirisch noch genauer zu untersuchenden – Vermutung, dass die meisten Fahrer einen Plan haben, auf welchem Parkplatz sie parken und auf welchem Weg sie dorthin gelangen wollen. Dabei gilt für auswärtige Fans, dass sie weniger stark an ihren Plänen festhalten, auch wenn sie (aus Modellierungsgründen) ebenfalls eine Liste priorisierter Parkplätze haben. Zudem unterstellen wir, dass alle Fahrer (gemäß SEU-Logik) eine möglichst kurze Fahrtzeit präferieren.

Als Indikator zur Messung der Zielerreichung auf der Mikro-Ebene verwenden wir daher die Zeit, welche die Fahrer durchschnittlich von der Einfahrt ins simulierte Gebiet benötigen, bis sie auf irgendeinen Parkplatz gelangt sind.

Zusätzlich untersuchen wir, inwiefern der letztendlich erreichte Parkplatz den Wünschen der Fahrer entspricht. Dazu statthen wir jeden simulierten Fahrer mit einer individuellen, geordneten Liste von drei Wunschparkplätzen aus, was uns in die Lage versetzt, durch Vergleich mit dem tatsächlich erreichten Parkplatz den Grad der Zielerreichung zu messen.

3.8 Zwischenfazit

Mit dem Basis-Framework SUMO und seinen Erweiterungen um ein soziologisches Handlungsmodell (MSE/MFS) und um unterschiedliche Fahrertypen stehen nunmehr alle Komponenten zur Verfügung, die zur Modellierung der Mikro-Ebene erforderlich sind. Die Landschaft in Form einer Verkehrssimulation sowie die Fahrermischverhältnisse und die Governance-Modi bilden die benötigten Komponenten der Makro-Ebene. Die Wechselwirkungen zwischen Mikro- und Makro-Ebene sind softwaretechnisch einerseits durch Anwendung des Esser'schen Dreischritts (Logiken der Situation, der Selektion und der Aggregation) abgebildet; hinzu kommen für den konkreten Fall die Interventionstechniken des Parkleit- und Verkehrsleitsystems sowie die unterschiedlichen Indikatoren, mit deren Hilfe sich nicht nur die individuelle Zielerreichung, sondern auch die aggregierten Effekte auf der Systemebene vermessen lassen.

4. Experimente und Ergebnisse

Mit dem in Abschnitt 3 entwickelten Modell, bestehend aus dem Verkehrs-Simulationsframework SUMO-S und dem dort beschriebenen Verkehrs-Szenario, wurden 6000 Simulations-

läufe durchgeführt, und zwar jeweils 500 mit jeder der 12 möglichen Kombinationen der drei Governance-Modi (STRG_H, STRG_W, KOOR) sowie der vier Fahrer-Mischungen (Mix₀ bis Mix₃).⁴ Um zu vermeiden, dass die zufällig gewählten Startwerte immer wieder das gleiche Ergebnis produzieren und dies ggf. zu falschen Schlussfolgerungen führen könnte, wurde die Ausgangskonstellation einer ansonsten deterministisch ablaufenden Simulation durch Randomisierung der Startzeiten der einzelnen Fahrzeuge leicht variiert.

Bei den Simulationsläufen wurden Verkehrsströme simuliert (z.B. von Norden in das simulierte Gebiet einfahrende Autos mit Fans der Gastmannschaft), wie sie typischerweise bei einem Bundesligaspiel an einem Samstagnachmittag auftreten. Außer Betracht geblieben sind die – teils gleichzeitig, teils versetzt – anfallenden Verkehrsströme zu den Dortmunder Westfalenhallen in unmittelbarer Nähe.

4.1 Makro-Indikator Gesamtzeit

Der erste Global-Indikator ist die Gesamtzeit (gemessen als Dauer des Simulationslaufs), die benötigt wird, bis sämtliche Fahrer einen Parkplatz erreicht haben. Überraschenderweise unterscheiden sich die Governance-Modi an diesem Punkt nicht so stark, wie ursprünglich vermutet.⁵

Tabelle 2: Durchschnittliche Simulationsdauer (kleine Werte sind besser als große)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folgsame)	Mix ₁ (realitätsnah)	Mix ₂ (mehr Folgsame)	Mix ₃ (mehr Sture)	
STRG_Hart (VLS)	12.796	13.845	13.035	14.206	13.695
STRG_Weich (PLS)	13.984	13.117	13.020	13.158	13.098
KOORdination	14.561	14.025	14.068	14.100	14.064
Spalten-Mittelwert	13.780	13.662	13.374	13.821	

Wie Tabelle 2 belegt, schneidet die weiche Steuerung (STRG_W) mit einem (Zeilen-)Mittelwert von 13.098, der den Durchschnitt der Ergebnisse für Mix₁ bis Mix₃ darstellt, am besten ab. Die harte Steuerung (STRG_H: 13.695) und die dezentrale Koordination (KOOR: 14.064) weisen deutlich schlechtere Mittelwerte auf. Die Konfidenzintervalle sind zudem hinlänglich schmal und überschneiden sich nicht.

Im Modus der weichen Steuerung (STRG_W) findet sich auch der beste Einzelwert von 13.020, und zwar für den Mix₂ mit mehr folgsamen Fahrern, der sich zudem deutlich von den anderen Fahrer-Mischverhältnissen (Mix₁ und Mix₃) im Modus der weichen Steuerung abhebt.

Dieser Wert liegt aber nur knapp unter dem Wert von 13.035 für STRG_H. Da sich die Konfidenzintervalle hier überschneiden und auch der t-Test fehlschlägt, kann hieraus allenfalls eine Überlegenheit von Steuerung gegenüber Koordination abgeleitet werden, jedoch keine Differenz zwischen den beiden Steuerungs-Modi.

4 Die hohe Zahl an Replikationen wurde gewählt, um möglichst kleine Konfidenzintervalle der Mittelwerte unterschiedlicher Indikatoren zu erhalten und damit eine hohe Reliabilität der Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Zur Methodik der Konfidenzintervalle siehe Cohen 1994. Nachfolgend werden Konfidenzintervalle nur angegeben, wenn sie *nicht* überschneidungsfrei sind, eine Unterscheidbarkeit der Gruppen also nicht gegeben ist.

5 In den folgenden Ausführungen wird der hypothetische Mix₀ nur als Referenz-Szenario mit betrachtet.

4.2 Makro-Indikator Systemstabilität

Der zweite Indikator auf Systemebene ist die Systemstabilität, für die wir die Maßzahl S verwenden (vgl. Abschnitt 3.7). Da Steuerung, wie oben erwähnt, immer auf dem Umweg über die Mikro-Ebene der Akteure funktioniert (vgl. Abschnitt 2), kommt es hier ebenfalls darauf an, in welchem Zustand sich das Steuerungsobjekt befindet, konkret: welche Fahrertypen in welchem Mischungsverhältnis simuliert wurden (vgl. Abschnitt 3.6).

Tabelle 3: Maßzahl S x(kleine Werte sind besser als große)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folg- same)	Mix ₁ (realitäts- nah)	Mix ₂ (mehr Folg- same)	Mix ₃ (mehr Sture)	
STRG_Hart (VLS)	5,858	8,011	9,340	9,308	8,886
STRG_Weich (PLS)	6,301	10,187	5,820	9,591	8,533
KOORdination	8,500	10,064	10,181	10,603	10,283
Spalten-Mittelwert	6,886	9,421	8,447	9,834	

Die Zahlen in Tabelle 3 verdeutlichen, dass ein pauschaler Vergleich der Governance-Modi (also eine zeilenweise Betrachtung) wenig aussagekräftig ist. Die weiche Steuerung (STRG_W: 8,533) schneidet ein wenig besser ab als die harte Steuerung (STRG_H: 8,886); die dezentrale Koordination (KOOR: 10,283) fällt hingegen deutlich ab. Aber eine derartige Betrachtung der Mittelwerte ist wenig aussagekräftig, weil die Werte innerhalb der Zeilen stark streuen. Denn der gute Durchschnittswert für die weiche Steuerung (STRG_W) resultiert maßgeblich aus dem Wert 5,820 für Mix₂, der mit großem Abstand den besten Wert aller realistischen Szenarien bildet und zudem deutlich unter den Werten von 10,181 für dezentrale Koordination (KOOR) und 9,340 (STRG_H) für denselben Mix liegt. Offenbar lässt sich mit Hilfe von Anreiz-Steuerung die Stabilität in Mix₂ erheblich verbessern, während mit einer Erhöhung der Steuerungsintensität in Richtung harter Steuerung wenig zu gewinnen ist.

In den beiden anderen Fahrer-Mischverhältnissen (Mix₁ und Mix₃) ist hingegen der Unterschied zwischen weicher Steuerung (STRG_W) und dezentraler Koordination (KOOR) deutlich geringer. Fahrer-Mischverhältnisse mit mehr Sturköpfen als in Mix₂ führen offenbar nicht zu einer Verbesserung der Systemstabilität beim Wechsel von Koordination zu weicher Steuerung.⁶

4.2.1 „Actors matter“ (Mix2)

Man kommt offenkundig nicht umhin, die Ebene der Akteure einzubeziehen, um zu gehaltvollen Aussagen über die Leistungsfähigkeit von Governance zu gelangen. Denn die Performance der Governance-Modi hängt stark vom Mischungsverhältnis der Fahrer ab. Weiche Steuerung (STRG_W) funktioniert am besten in Kombination mit Mix₂, der durch einen höheren Anteil folgsamer Fahrer als im realitätsnahen Szenario gekennzeichnet ist. Folgsamkeit bedeutet in diesem Kontext nicht, dass die Fahrer wie Automaten funktionieren, sondern lediglich, dass ein höherer Anteil (nämlich 32 % statt 13 %) bereit ist, den Anweisungen bzw.

⁶ Bei Mix₁ überschneiden sich zudem die Konfidenzintervalle: STRG_W [10,038; 10,335], KOOR [9,970; 10,157].

Hinweisen zu folgen, statt an den eigenen Plänen unbeirrt festzuhalten wie beispielsweise der Denker bzw. der Sturkopf (vgl. Abschnitt 3.6).

Überraschenderweise unterschreitet der Wert von 5,820 (Mix_2) sogar den Vergleichswert von 6,301, der für weiche Steuerung im Mix_0 , einem eher fiktiven Szenario mit nur folgsamen Fahrern, erzielt wurde. Offenkundig ist Folgsamkeit ein wichtiger Faktor für das Gelingen von Governance (Mix_2); aber zu viele Agenten, die sich willenlos vom System steuern lassen, sind anscheinend auch nicht vorteilhaft (Mix_0). Es kommt vielmehr, wie bereits Ostrom (2000) in Bezug auf das Problem kollektiven Handelns herausgefunden hat, auf die Mischung multipler Spieler-Typen an. Denn die Akteure funktionieren nicht wie Automaten, sondern haben Spielräume für eigene Entscheidungen, die je nach Typ unterschiedlich genutzt werden. Und gerade diese Heterogenität scheint der Schlüssel zum Erfolg zu sein.

4.2.2 *Mix1 und Mix3*

Ein zweiter Wert fällt auf, nämlich der Wert von 8,011 für harte Steuerung (STRG_H) im Mix_1 , der den zweitbesten Wert aller realistischen Szenarien darstellt. Wir hatten bereits festgestellt, dass bei einer Population mit mehr folgsamen Fahrgästen (Mix_2) mit harter Steuerung nichts zu gewinnen ist. In einem realistischen Szenario (Mix_1), das durch einen höheren Anteil rationaler Egoisten gekennzeichnet ist, zeigen ‚harte‘ Interventionen hingegen eine deutliche Wirkung, nämlich in Form einer Verbesserung von Werten knapp über 10 (für STRG_W bzw. KOOR) auf 8,011 (für STRG_H). Wenn der Anteil der Sturköpfe noch weiter steigt (Mix_3), ist der Effekt von harter Steuerung mit einer Verbesserung auf nur 9,308 hingegen kaum spürbar.⁷ Offenkundig ist im hier untersuchten Szenario ein Mischungsverhältnis nachteilig, das zu viele rationale Egoisten enthält, die durch harte Steuerung weniger leicht zu beeinflussen sind.

4.3 *Makro-Indikator Geschwindigkeit*

Der dritte Makro-Indikator bestätigt zunächst die bereits getroffene Aussage, dass dezentrale Koordination (KOOR : 11,064) im Durchschnitt deutlich schlechtere Werte liefert als die beiden Governance-Modi weiche Steuerung und harte Steuerung.

⁷ Die Überschneidung der 95%-Konfidenzintervalle für STRG_H [8,957; 9,657] und STRG_W [9,442; 9,739] belegt zudem, dass diese Differenz nicht relevant ist.

Tabelle 4: Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge (große Werte sind besser als kleine)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folgsame)	Mix ₁ (realitätsnah)	Mix ₂ (mehr Folgsame)	Mix ₃ (mehr Sture)	
STRG_Hart (VLS)	12,111	14,090	13,278	14,549	13,972
STRG_Weich (PLS)	10,915	12,007	13,504	11,910	12,474
KOORdination	9,426	11,110	11,097	10,984	11,064
Spalten-Mittelwert	10,817	12,402	12,626	12,481	

Bei der Durchschnittsgeschwindigkeit schneidet nun die harte Steuerung (STRG_H: 13,972) deutlich besser ab als die weiche Steuerung (STRG_W: 12,474). Die Einzelwerte zeigen jedoch eine auffällige Ausnahme: Bei einem größeren Anteil folgsamer Fahrer in Mix₂ ist die weiche Steuerung etwas besser (STRG_W: 13,504) als die harte Steuerung (STRG_H: 13,278). Die harte Steuerung ist hingegen, wie schon beim Makro-Indikator Systemstabilität (vgl. Abschnitt 4.2), besonders effizient, wenn sie auf einen größeren Anteil rationaler Egoisten trifft; hier finden sich die beiden Spitzenwerte von 14,549 (Mix₃) und 14,090 (Mix₁).

Die Maßzahl P , welche die (normierte) Durchschnittsgeschwindigkeit mit der (normierten) Systemstabilität kombiniert, bestätigt dieses Bild:

Tabelle 5: Maßzahl P (große Werte sind besser als kleine)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folgsame)	Mix ₁ (realitätsnah)	Mix ₂ (mehr Folgsame)	Mix ₃ (mehr Sture)	
STRG_Hart (VLS)	0,761	0,780	0,728	0,769	0,759
STRG_Weich (PLS)	0,715	0,672	0,806	0,680	0,719
KOORdination	0,625	0,646	0,643	0,631	0,640
Spalten-Mittelwert	0,700	0,699	0,726	0,693	

Das Gefälle zwischen harter Steuerung (STRG_H: 0,758), weicher Steuerung (STRG_W: 0,719) und dezentraler Koordination (KOOR: 0,640) ist unübersehbar – wiederum mit Ausnahme von Mix₂, der im Fall weicher Steuerung (STRG_W) den Spitzenwert von 0,806 aufweist. Der zweit- und der drittbeste Wert finden sich jedoch bei harter Steuerung (STRG_H) im realitätsnahen Mix₁ (0,780) bzw. im Mix₃ (0,769) mit einem hohen Anteil rationaler Egoisten.⁸ Dies bestätigt folgende, oben bereits angedeutete Feststellungen:

- Weiche Steuerung ist bei einem hohen Anteil folgsamer Fahrer (Mix₂) besonders wirksam, in anderen Fällen hingegen kaum besser als dezentrale Koordination.
- Ein Wechsel von weicher zu harter Steuerung ist im Fall von Mix₂ kontraproduktiv, bei einem höheren Anteil rationaler Egoisten (Mix₁ und Mix₃) hingegen produktiv.
- Dezentrale Koordination ist in allen Fällen den anderen Governance-Modi unterlegen.

8 Die 95%-Konfidenzintervalle bestätigen dieses Bild. Sie überschneiden sich in den Spalten nicht und in den Zeilen nur in zwei Fällen (Mix₁/Mix₃ – STRG_H und Mix₁/Mix₂ – KOOR), in denen die Mittelwerte ohnehin dicht beieinander liegen.

4.4 Mikro-Indikator Fahrzeit

Wie bereits erwähnt, soll der Erfolg von Governance nicht nur anhand von Makro-Indikatoren (zur Vermessung der System-Performance), sondern auch anhand von Mikro-Indikatoren (zur Vermessung des Grades der individuellen Zielerreichung) untersucht werden, und zwar mit Hilfe der Indikatoren *Fahrzeit* sowie *Wunschparkplatz*.

Denn es ist zu vermuten, dass der Erfolg von Governance auf Systemebene – zumindest auf längere Sicht – mit dem Erfolg der individuellen Akteure zusammenhängt. So wäre es durchaus denkbar, dass das System seine Ziele erreicht, nämlich alle Fahrzeuge vor Spielbeginn auf einen Parkplatz zu lotsen, dass dies jedoch den individuellen Zielen der einzelnen Akteure zuwiderläuft, beispielsweise ihre angestammte Route zu nutzen bzw. ihren Wunschparkplatz zu erreichen. Derartige Interessenkonflikte können das Vertrauen in das System schwächen und so nicht nur zu einer suboptimalen Nutzung der Möglichkeiten führen, die das System bietet, sondern auch die Nachhaltigkeit von Steuerungsbemühungen beeinträchtigen.

Wir vermuten, dass eine Systemsteuerung nur dann langfristig erfolgreich sein kann, wenn auch die Akteure – gemessen an ihren je individuellen Zielen – zufrieden sind und nicht in größerer Zahl aus dem System ausscheiden (Exit-Option) bzw. ihren Unmut kundtun (Voice). Dieser Aspekt der Nachhaltigkeit von Governance ist unseres Wissens bislang von der einschlägigen Forschung nicht thematisiert bzw. empirisch erforscht worden.

Die Daten für die durchschnittliche Fahrzeit, die alle Agenten bis zur Erreichung irgendeines Parkplatzes benötigten, ergeben folgendes Bild:

Tabelle 6: Durchschnittliche Fahrzeiten aller Agenten (kleine Werte sind besser als große)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folg- same)	Mix ₁ (realitäts- nah)	Mix ₂ (mehr Folg- same)	Mix ₃ (mehr Stu- re)	
STRG_Hart (VLS)	438,0	465,0	430,8	462,4	452,7
STRG_Weich (PLS)	570,3	626,3	466,7	641,2	578,1
KOORDination	799,3	789,0	781,4	814,7	795,0
Spalten-Mittelwert	602,5	626,8	559,6	639,4	

Zu unserer Überraschung reproduzieren die Daten der Mikro-Ebene nahezu vollständig das Bild, das sich bereits bei der Analyse der Makro-Indikatoren ergeben hatte. Angesichts möglicher Interessenkonflikte zwischen System und Akteuren hatten wir eher mit Differenzen gerechnet und nicht mit folgendem Ergebnis:

- Dezentrale Koordination (KOOR: 795,0) führt zu einem deutlich schlechteren Ergebnis als weiche Steuerung (STRG_W: 578,1) und harte Steuerung (STRG_H: 452,7) – und zwar nicht nur bei den (Zeilen-) Mittelwerten, sondern auch für jeden einzelnen Fahrer-Mix.
- Die offenkundigste Abweichung von diesem Muster findet sich bei der Kombination von weicher Steuerung und Fahrer-Mix₂, wo ein sehr gutes Ergebnis (466,7) erzielt wird, das dicht an den Ergebnissen für harte Steuerung liegt.
- Allerdings hängt die Leistungsfähigkeit weicher Steuerung stark von der Zusammensetzung der Agenten-Typen ab; denn bei einem höheren Anteil rationaler Egoisten (Mix₁ oder Mix₃) sinkt die Performance auf mittelmäßige Werte von über 600.

4.5 Mikro-Indikator Wunschparkplatz

Neben der Fahrzeit haben wir untersucht, wie hoch der Anteil der Agenten ist, die einen ihrer drei Wunschparkplätze erreicht haben:

Tabelle 7: Anteil der Agenten, die einen der drei Wunschparkplätze erreicht haben (große Werte sind besser als kleine)

Governance-Modus	Fahrermix				Zeilen-Mittelwert (Mix ₁ bis Mix ₃)
	Mix ₀ (nur Folg- same)	Mix ₁ (realitäts- nah)	Mix ₂ (mehr Folg- same)	Mix ₃ (mehr Stu- re)	
STRG_Hart (VLS)	69,0%	73,2%	72,8%	73,2%	73,1%
STRG_Weich (PLS)	69,3%	69,5%	69,8%	70,7%	70,0%
KOORDination	75,2%	71,3%	70,5%	72,3%	71,4%
Spalten-Mittelwert	71,2%	71,3%	71,0%	72,1%	

Zunächst überrascht die erstaunliche hohe Quote von circa 70% von Agenten, die auf einem ihrer Wunschparkplätze gelandet sind. Das Erreichen der Systemziele und das Erreichen der Akteurziele scheint – zumindest in unserem Szenario – weit weniger Konflikte zu produzieren als ursprünglich vermutet.

Zudem liegen die Werte so dicht beieinander, dass keine qualitativ sinnvolle Interpretation der Unterschiede zwischen den Modi und den Fahrer-Mixen möglich ist.⁹

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Sowohl die Analyse der Makro-Indikatoren als auch die Analyse der Mikro-Indikatoren führt zu Ergebnissen, die größtenteils in die gleiche Richtung weisen:

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse (Klammern = nur geringfügige Unterschiede)

Arbeitshypothesen	Makro-Indikatoren			Mikro-Indikatoren	
	Gesamtzeit	Stabilität (S)	Systemperformance (P)	Fahrzeit	Parkplatz
(A1) Koordination besser als Steuerung	Nein	Nein	Nein	Nein	(Nein)
(A2) Weiche Steuerung besser als harte Steuerung	Ja	Ja	Nein	Nein	(Nein)
(Z3) Bester Wert für Mix ₂ /STRG_W	Ja	Ja	Ja	Ja	(Nein)
(Z4) Harte Steuerung leistungsfähig bei rationalen Egoisten (Mix ₁ und Mix ₃)	Nein	Ja	Ja	(Ja)	(Ja)

⁹ Die 95%-Konfidenzintervalle sind bis auf eine Ausnahme disjunkt: Bei STRG_H überschneiden sie sich für Mix₁ [0,7310; 0,7320] und Mix₃ [0,7314; 0,7323].

Sämtliche von uns untersuchten Indikatoren verweisen darauf, dass der Governance-Modus der Steuerung in der Regel zu einer besseren Performance führt als der Modus der dezentralen Koordination, was im Widerspruch zu Annahme A1 steht. Ob dabei die weiche Steuerung besser abschneidet als die harte Steuerung, lässt sich nicht pauschal beantworten (Annahme A2); dies hängt offensichtlich stark von der Zusammensetzung der Fahrertypen ab (Zusatzannahme Z3). Denn hier zeigt sich das eindeutigste Ergebnis unserer Analysen: Die Kombination von weicher Steuerung und Fahrer-Mix₂ mit mehr folgsamen Fahrern führt bei allen Indikatoren zu dem besten Wert, der zum Teil erheblich über bzw. unter den entsprechenden Vergleichswerten für andere Modi bzw. Mixe liegt. Bei einem höheren Anteil rationaler Egoisten scheint hingegen harte Steuerung besser abzuschneiden (Zusatzannahme Z4).

5. Fazit

In dieser Abhandlung haben wir ein Angebot unterbreitet, wie man die Begriffe *Steuerung* und *Governance* so definieren und operationalisieren kann, dass sie von einer empirisch-experimentell ausgerichteten Sozialforschung genutzt werden können. Mit Hilfe der Methode der agentenbasierten Modellierung und Simulation haben wir ein komplexes System nachgebaut, mit dem wir Simulationsläufe in unterschiedlichen Governance-Modi durchgeführt haben. Damit wollten wir zunächst zeigen, dass es möglich ist, den Gegenstand „Steuerung komplexer Systeme“ experimentell zu erforschen und die Mechanismen von Governance, insbesondere die Wechselwirkung von Mikro- und Makro-Ebene, zu analysieren.

Wir konnten dabei auf eine Reihe von Konzepten der bisherigen Governance-Forschung rekurrieren, die wir lediglich dahingehend ergänzt und erweitert haben, dass wir auf die wichtige Rolle der Akteure (bzw. der Typen von Akteuren) verweisen, deren Zusammensetzung den Erfolg von Governance offenbar stark beeinflusst.

5.1 Überprüfung der Annahmen

Die Ausgangsfrage, welcher Governance-Modus am besten geeignet ist, das Problem der Steuerung komplexer Systeme zu bewältigen, lässt sich anhand unserer Analysen nicht pauschal beantworten. Die Überprüfung der beiden Arbeitshypothesen führt vielmehr zu einem uneindeutigen Bild.

5.1.1 Arbeitshypothese A1

Unsere Auswertungen widerlegen zunächst die Annahme, dass die dezentrale Koordination der hierarchischen Steuerung überlegen ist; dieser Governance-Modus schneidet vielmehr deutlich schlechter ab als die beiden Modi der weichen und der harten Steuerung.

Eine Erklärung dieses Befundes könnte daran ansetzen, dass eine Bewältigung krisenhafter Situationen (z.B. Stau an einem neuralgischen Punkt) in komplexen Systemen, die unter Hochlast-Bedingungen operieren, nur möglich ist, wenn globale Informationen zur Verfügung stehen, die typischerweise nur die zentrale Steuerungsinstantz hat. Diesen Zusammenhang von Krisenmanagement und Governance genauer zu untersuchen, wäre eine Aufgabe künftiger Forschung.

5.1.2 Arbeitshypothese A2

Vergleicht man harte und weiche Steuerung, so ergibt sich ein unklares Bild. Einige Indikatoren weisen auf eine Überlegenheit der weichen Steuerung hin, andere führen zu gegenteiligen

Ergebnissen. Allerdings verbieten sich hier pauschale Urteile: Wie der Vergleich unterschiedlicher Fahrer-Mischverhältnisse zeigt, hängt es in hohem Maße von der Zusammensetzung der Agentenpopulation ab, wie gut Governance funktioniert. Bei einem höheren Anteil folgsamer Fahrer erzielt die weiche Steuerung Spitzenwerte, die allerdings weit entfernt von den Werten sind, die weiche Steuerung im Fall anderer Mischungsverhältnisse der Agententypen erreicht. Insofern erscheint es sinnvoll, den Blickwinkel zu erweitern und das Problem der Governance auch von den Akteuren bzw. den Agenten her zu denken.

Insgesamt zeigen unsere Experimente, dass es möglich ist, das Thema „Steuerung komplexer Systeme“ mit Hilfe experimenteller Methoden zu analysieren und auf diesem Wege zu teilweise unerwarteten neuen Erkenntnissen zu gelangen, die weitere Forschungsarbeit erforderlich machen. Dies gilt insbesondere für den Zusammenhang von Governance-Modi und Mischungsverhältnissen von Akteur-Typen. Aber auch das Thema Mixed-mode bedarf zweifellos weiterer Untersuchungen.

5.2 Einschränkungen und weiterführende Perspektiven

Die vorliegende Abhandlung ist ein erster Versuch, sich dem Thema Governance aus der Perspektive der experimentellen Soziologie zu nähern, und zwar mit Hilfe der softwaretechnischen Implementation des SEU- und des MFS-Modells. Da wir unser Modell an einem konkreten Fall entwickelt haben, muss die Frage der Belastbarkeit der Ergebnisse wie auch ihrer Verallgemeinerbarkeit offen bleiben. Zudem haben wir bislang lediglich die operative Steuerung eines funktionellen Teilsystems untersucht. Es bleibt eine Aufgabe künftiger Forschung zu überprüfen, ob sich dieser Ansatz auch auf andere Ebenen von Governance übertragen lässt und ob es möglich ist, das Zusammenspiel unterschiedlicher Ebenen von Governance zu modellieren.

Literatur

Benz, Arthur / Susanne Lütz / Uwe Schimank / Georg Simonis (Hrsg.) (2007): Handbuch Governance. Theoretische Grundlagen und empirische Anwendungsfelder, Wiesbaden.

Bonabeau, Eric (2002): Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 99 (90003), S. 7280-7287.

Cohen, Jacob (1994): The earth is round ($p < .05$), in: American Psychologist 49/12, S. 997-1003.

Epstein, Joshua M. / Robert Axtell (1996): Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up, Washington / D.C.

Esser, Hartmut (1991): Alltagshandeln und Verstehen. Zum Verhältnis von erklärender und verstehender Soziologie am Beispiel von Alfred Schütz und „Rational Choice“, Tübingen.

Esser, Hartmut (1993): Soziologie. Allgemeine Grundlagen, Frankfurt / Main.

Esser, Hartmut (1999): Soziologie. Spezielle Grundlagen, Bd. 1: Situationslogik und Handeln, Frankfurt / Main.

Etzioni, Amitai (1967): Mixed Scanning: A „Third“ Approach to Decision-Making, in: Public Administration Review 27/5, S. 385-392.

Fink, Robin D. / Johannes Weyer (2011): Autonome Technik als Herausforderung der soziologischen Handlungstheorie, in: Zeitschrift für Soziologie 40/2, S. 91-111.

Grote, Gudela (2009): Management of Uncertainty. Theory and Application in the Design of Systems and Organizations, Berlin.

Krauß, Stefan (1998): Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics (PhD thesis), Köln, abrufbar unter: <http://sumo-sim.org/pdf/KraussDiss.pdf>, letztes Abrufdatum: 9.2.2014.

Kron, Thomas (2010): Zeitgenössische soziologische Theorien. Zentrale Beiträge aus Deutschland, Wiesbaden.

Kroneberg, Clemens (2005): Die Definition der Situation und die variable Rationalität der Akteure. Ein allgemeines Modell des Handelns, in: Zeitschrift für Soziologie 34, S. 344-363.

Kroneberg, Clemens (2007): Wertrationalität und das Modell der Frame-Selektion, in: Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie 59, S. 215-239.

Kroneberg, Clemens (2009): Methodologie statt Ontologie: Das Makro-Mikro-Makro-Modell als einheitlicher Bezugsrahmen der akteurstheoretischen Soziologie, in: Jens Greve / Rainer Schützeichel / Annette Schnabel (Hrsg.), Das Mikro-Makro-Modell der soziologischen Erklärung, Wiesbaden.

Kroniger, Jens / Fabian Lücke (2010): Analyse und Evaluation von Steuerungsmodellen am Beispiel von Verkehrstelematiksystemen (Diplomarbeit, TU Dortmund).

Langlois, Richard N. / Paul L. Robertson (1992): Networks and innovation in a modular system: Lessons from the microcomputer and stereo component industries, in: Research Policy 21, S. 297-313.

LaPorte, Todd R. / Paula M. Consolini (1991): Working in Practice But Not in Theory: Theoretical Challenges of „High Reliability Organizations“, in: Journal of Public Administration Research and Theory 1, S. 19-47.

Luhmann, Niklas (1988): Die Wirtschaft der Gesellschaft, Frankfurt / Main.

Mayntz, Renate (1987): Politische Steuerung und gesellschaftliche Steuerungsprobleme – Anmerkungen zu einem theoretischen Paradigma, in: Thomas Ellwein et al. (Hrsg.), Jahrbuch zur Staats- und Verwaltungswissenschaft, Baden-Baden, S. 89-110.

Mayntz, Renate (1988): Funktionelle Teilsysteme in der Theorie sozialer Differenzierung, in: Dies. et al. (Hrsg.), Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftlicher Teilsysteme, Frankfurt / Main, S. 11-44.

Mayntz, Renate (1993): Policy-Netzwerke und die Logik von Verhandlungssystemen, in: Adrienne Héritier (Hrsg.), Policy-Analyse. Kritik und Neuorientierung (Sonderheft 24 der Politischen Vierteljahresschrift), Opladen, S. 39-56.

Mayntz, Renate / Fritz W. Scharpf (1995): Steuerung und Selbstorganisation in staatsnahen Sektoren, in: Dies. (Hrsg.), Gesellschaftliche Selbstregelung und politische Steuerung, Frankfurt / Main, S. 9-38.

Ostrom, Elinor (2000): Collective action and the evolution of social norms, in: The Journal of Economic Perspectives 14, S. 137-158.

Resnick, Michael (1995): Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Micro-worlds (Complex Adaptive Systems), Cambridge / Mass.

Richter, Klaus / Jan-Michael Rost (2004): Komplexe Systeme, Frankfurt / Main.

Rifkin, Jeremy (2010): Die emphatische Zivilisation. Wege zu einem globalen Bewusstsein, Frankfurt / Main.

Roberts, Karlene A. (Hrsg.) (1993): New Challenges to Understanding Organisations, New York / NY.

Schelling, Thomas (1969): Models of segregation, in: The American Economic Review 59, S. 488-493.

Schimank, Uwe (2000): Handeln und Strukturen. Einführung in eine akteurstheoretische Soziologie, München.

Schneider, Volker / Johannes M. Bauer (2009): Von der Governance- zur Komplexitätstheorie. Entwicklungen der Theorie gesellschaftlicher Ordnung, in: Johannes Weyer / Ingo Schulz-Schaeffer (Hrsg.), Management komplexer Systeme. Konzepte für die Bewältigung von Intransparenz, Unsicherheit und Chaos, München, S. 31-53.

Simonis, Georg (1995): Ausdifferenzierung der Technologiepolitik – vom hierarchischen zum interaktiven Staat, in: Georg Simonis / Renate Martinsen (Hrsg.), Paradigmenwechsel in der Technologiepolitik, Opladen, S. 381-404.

SUMO (2010): SUMO: Simulation of Urban MObility (0.12). German Aerospace Center, Institute of Transportation Systems, abrufbar unter: <http://sumo.sourceforge.net>, letztes Abrufdatum: 9.2.2014.

Surowiecki, James (2005): *The Wisdom of Crowds*, New York / NY.

Treib, Oliver / Holger Bähr / Gerda Falkner (2007): Modes of Governance: towards a conceptual clarification, in: *Journal of European Public Policy* 14, S. 1-20.

Weyer, Johannes / Robin D. Fink / Tobias Liboschik (2011): Softwarebasierte Methoden der Netzwerk-Analyse, in: Johannes Weyer (Hrsg.), *Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung*, 2. Aufl., München, S. 109-131.

Johannes Weyer / Fabian Adelt / Robin D. Fink (2013): Steuerung komplexer Systeme. Ein Mehrebenen-Modell von Governance. Soziologisches Arbeitspapier 36/2013. Dortmund: TU Dortmund, abrufbar unter: <http://www.techniksoziologie-dortmund.de/Veroeffentlichungen/Files/2013/AP36-Mehrebenen-Modell.pdf>, letztes Abrufdatum: 9.2.2013.

Weyer, Johannes / Ingo Schulz-Schaeffer (Hrsg.) (2009): Management komplexer Systeme. Konzepte für die Bewältigung von Intransparenz, Unsicherheit und Chaos, München.

Willke, Helmut, 1989: *Systemtheorie entwickelter Gesellschaften. Dynamik und Riskanz moderner gesellschaftlicher Selbstorganisation*. Weinheim.

Willke, Helmut (1995): *Systemtheorie III: Steuerungstheorie. Grundzüge einer Theorie der Steuerung komplexer Sozialsysteme*, Stuttgart.

Willke, Helmut (2007): *Smart Governance. Governing the Global Knowledge Society*, Frankfurt / Main.

Winkler, Fabian (2011): *Essenswahl in der Mensa. Ein empirisch fundiertes Handlungsmodell (Bachelorarbeit)*, Dortmund: TU Dortmund, Fachgebiet Techniksoziologie.

Fabian Adelt (geb. Lücke)
 Prof. Dr. Johannes Weyer
 Robin D. Fink
 TU Dortmund
 Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät
 Fachgebiet Techniksoziologie
 Otto-Hahn-Str. 4
 44227 Dortmund
 fabian.adelt@tu-dortmund.de
 johannes.weyer@tu-dortmund.de
 robin.fink@tu-dortmund.de