

Julius Konrad, Johannes Weyer, Kay Cepera, Fabian Adelt

ECHTZEITSTEUERUNG KOMPLEXER SYSTEME

EINE SIMULATIONSSTUDIE

Soziologisches Arbeitspapier Nr. 57/2020

Herausgeber
Prof. em. Dr. H. Hirsch-Kreinsen
Prof. Dr. J. Weyer

Echtzeitsteuerung komplexer Systeme

Eine Simulationsstudie

**Julius Konrad, Johannes Weyer, Kay Cepera,
Fabian Adelt**

**Soziologisches Arbeitspapier Nr. 57
(April 2020)**

TU Dortmund

ISSN 1612-5355

Herausgeber

Prof. em. Dr. Hartmut Hirsch-Kreinsen
vormals Lehrstuhl Wirtschafts- und Industriesoziologie
Hartmut.Hirsch-Kreinsen@tu-dortmund.de

Prof. Dr. Johannes Weyer
Fachgebiet Techniksoziologie
Johannes.Weyer@tu-dortmund.de

Technische Universität Dortmund
Fakultät Sozialwissenschaften
D-44221 Dortmund

Ansprechpartnerin:

Marion Nölle, e-mail: ts.wiwi@tu-dortmund.de

Die Soziologischen Arbeitspapiere erscheinen in loser Folge. Mit ihnen werden Aufsätze (oft als Preprint), sowie Projektberichte und Vorträge publiziert. Die Arbeitspapiere sind daher nicht unbedingt endgültig abgeschlossene wissenschaftliche Beiträge. Sie unterliegen jedoch in jedem Fall einem internen Verfahren der Qualitätskontrolle. Die Reihe hat das Ziel, der Fachöffentlichkeit soziologische Arbeiten aus der Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Dortmund vorzustellen. Anregungen und kritische Kommentare sind nicht nur willkommen, sondern ausdrücklich erwünscht.



Die in diesem Arbeitspapier präsentierten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „ABIDA“ unter dem Förderkennzeichen 01IS15016A erarbeitet.

Inhalt

Inhalt	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung	1
2 Konzeptionelle Grundlagen	2
2.1 Mehrebenen-Modell von Governance	2
2.2 Echtzeitsteuerung	5
2.3 Modellierung von Echtzeitsteuerung	8
3 Theorie und Praxis der Verkehrssteuerung	11
3.1 Datenerfassung und -nutzung im Verkehrswesen	11
3.2 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses	14
3.3 Meilensteine der Verkehrstelematik	16
3.4 Big Data und Echtzeit im Verkehrswesen	18
3.5 TomTom	21
3.6 Google Maps	25
3.7 Die öffentliche Hand und andere Akteure	27
3.8 Zwischenfazit	30
4 Agentenbasierte Modellierung	33
4.1 ABM als Methode zur Erforschung von Systemdynamiken	33
4.2 Der Simulator SimCo	37
5 Entwicklung der Szenarien	43
5.1 Basisszenario	44
5.2 Basisszenario mit starrer Routenplanung	44
5.3 Intelligente Navigation mit Echtzeitinformationen	45
5.4 Koordinierter Modus	46
6 Experimente	48
6.1 Setup	48
6.2 Basisszenario	50
6.3 Starre Routenplanung	55
6.4 Intelligente Navigation	59
6.5 Koordinierter Modus	64
7 Fazit	67
8 Literaturverzeichnis	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erweitertes Makro-Mikro-Makro-Modell (vgl. Esser 2003, S. 98)....	2
Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung eines Mehrebenen-Modells von Governance	4
Abbildung 3: Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses (Eigene Darstellung in Anlehnung an Gerlough und Huber 1975, S. 58)	15
Abbildung 4: Das Big-Data-Prozessmodell. (Weyer et al. 2018b, S. 74).....	21
Abbildung 5: Verkehrsdaten und Datenfusion TomTom (TomTom 2009, S. 3)....	22
Abbildung 6: Tatsächliche vs. gemeldete Staus (TomTom 2015, S. 6).....	23
Abbildung 7: Funktionsweise von IQ Routes (TomTom 2018b)	25
Abbildung 8: Fahrverbote auf Ausweichrouten in Tirol (www.adac.de)	29
Abbildung 9: Die Subsysteme von SimCo und deren Verknüpfungen (Adelt et al. 2018)	38
Abbildung 10: Grafische Benutzeroberfläche von SimCo (Adelt et al. 2018)	40
Abbildung 11: Pkw-Nutzung nach Agententypen im Basisszenario	52
Abbildung 12: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agententypen im Basisszenario.....	53
Abbildung 13: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario.....	54
Abbildung 14: Pkw-Nutzung nach Agententypen für die starre Routenplanung....	57
Abbildung 15: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei starrer Routenplanung.....	58
Abbildung 16: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei starrer Routenplanung	59
Abbildung 17: Pkw-Nutzung nach Agententypen für die intelligente Navigation .	62
Abbildung 18: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agententypen im Basisszenario und bei intelligenter Navigation.....	62
Abbildung 19: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei intelligenter Navigation.....	63
Abbildung 20: Maximale Emissionen auf den Kanten für intelligente Navigation und koordinierten Modus	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Akteurtypen (Teigelkamp 2015).....	41
Tabelle 2: Ergebnisse der Experimente mit SimCo (* in Prozent der jeweiligen Grenzwerte) (Adelt et al. 2018)	41
Tabelle 3: Emissionen, Auslastung und Modal Split für das Basisszenario	51
Tabelle 4: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die starre Routenplanung	55
Tabelle 5: Vergleich der starren Routenplanung mit dem Basisszenario	56
Tabelle 6: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die intelligente Navigation.....	60
Tabelle 7: Vergleich der intelligenten Navigation mit dem Basisszenario	61
Tabelle 8: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die intelligente Navigation.....	64
Tabelle 9: Vergleich von koordiniertem Modus und intelligenter Navigation mit dem Basisszenario.....	65
Tabelle 10: Gesamtübersicht der Governance-Modi im Vergleich zum Basisszenario.....	68

Abstract

Echtzeitsteuerung komplexer Systeme. Eine Simulationsstudie

Für diese Studie wurde eine Verkehrssimulation, basierend auf dem Simulator SimCo, entwickelt. In dieser Simulation wurden verschiedene Szenarien getestet, um die Effekte von Echtzeitsteuerung im Verkehrsnetz zu untersuchen. Die Szenarien basieren auf Experteninterviews mit Vertretern eines Navigationsdienstleisters, der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und Betreibern des öffentlichen Verkehrs. Alle Beteiligten befürworteten eine koordinierte Form der Steuerung des Straßenverkehrs. Diesen koordinierten Modus haben wir in der Simulation implementiert. Zunächst bekamen die Agenten Echtzeitinformationen über die Verkehrssituation und später auch Emissionsinformationen. Wir konnten zeigen, dass Echtzeitinformationen zu einer deutlichen Senkung von Staus, also einer höheren Netzeffizienz, führten. Damit einher ging allerdings eine leichte Steigerung der Emissionen. Entgegen den Erwartungen konnte der koordinierte Modus keine deutlichen Emissionssenkungen hervorrufen. Eine Senkung von Emissionsspitzen konnte jedoch erreicht werden.

Abstract

Real-Time Governance of Complex Systems. A Simulation Study

For this study we developed a traffic simulation based on the simulator SimCo and ran different governance scenarios regarding the effects of the distribution of real-time traffic data among drivers. The scenarios were based on interviews with experts from different fields, including a navigation service provider, the German federal highway research institute, and public transport providers. We found that a coordinated form of governance between private firms and local authorities is in their mutual interest. To analyse the impact of such a coordinated mode of governance, two scenarios were implemented. At first drivers would get real-time traffic information and secondly, they would also get emission information and change their route accordingly. We found that the use of real-time data does decrease traffic jams, and thus increases network efficiency, but also slightly increases emissions. Against the expectations of the interviewees, a coordinated form of governance could not reduce emissions, but helped distribute them more evenly.

1 Einleitung

In der digitalen Gesellschaft werden große Datenmengen verarbeitet, um die daraus gewonnenen Erkenntnisse für die Steuerung komplexer soziotechnischer Systeme zu nutzen. Diese Prozesse vollziehen sich zunehmend in Echtzeit, d. h. zwischen der Produktion der Daten durch Menschen und Maschinen und deren Nutzung für Zwecke der Systemsteuerung vergehen nur wenige Minuten. In diesen kurzen Zeiträumen generieren leistungsfähige Computer, die in der Lage sind, große Mengen Daten in hoher Geschwindigkeit zu verarbeiten, Lagebilder und Handlungsempfehlungen, auf deren Grundlage die einzelnen Systemkomponenten Entscheidungen treffen können. Wir bezeichnen diesen Prozess als Echtzeitsteuerung komplexer Systeme.

In einigen Bereichen der Gesellschaft wie etwa dem Verkehrssystem wird dieses Konzept seit einigen Jahren bereits erfolgreich eingesetzt (Kap. 3). Es kombiniert die zentrale Steuerung durch eine Leitstelle mit dezentraler Selbstorganisation, also der autonomen Entscheidung der einzelnen Systemkomponenten. Allerdings mangelt es bislang an einem theoretischen Verständnis dieses neuen Governance-Modus der zentralen Steuerung dezentraler Systeme. Die vorliegende Studie versteht sich daher als ein erster Versuch, einen konzeptionellen Rahmen zur Analyse von Echtzeitsteuerung zu entwickeln (Kap. 2).

Zudem sind empirische Studien rar, die folgende Fragen beantworten könnten:

- Wie funktioniert das Zusammenspiel von zentraler Steuerung und dezentralen Entscheidungen?
- Wie effizient ist dieser Governance-Modus im Vergleich zu anderen Modi?
- Wie groß sind die Handlungsspielräume der Akteure, wenn sie in Echtzeit gesteuert werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen haben wir Simulationsexperimente durchgeführt (Kap. 6), die mit der Methode der agentenbasierten Modellierung arbeiten (Kap. 4). Mit dem an der TU Dortmund entwickelte Simulator SimCo wurden unterschiedliche Szenarien aktueller und künftiger Verkehrssteuerung getestet (Kap. 5), in denen der Faktor „Echtzeit“ gezielt variiert wurde, um so die Frage zu beantworten, was sich ändert, wenn komplexe soziotechnische Systeme in Echtzeit operieren.

Ein wichtiges Thema sind die Konsequenzen, welche die Echtzeitsteuerung auf der individuellen Ebene (Mikroebene) auslösen. Im Mittelpunkt der Studie steht also die Frage, ob der einzelne Akteur unter Bedingungen der Echtzeitsteuerung noch in der Lage ist, planvoll und selbständig zu handeln, oder ob er zunehmend von Algorithmen abhängig wird. Ein zweites wichtiges Thema ist die Beherrschbarkeit von Echtzeitsystemen, also die Frage, ob die Systemzentrale in der Lage ist, ein komplexes soziotechnisches System so effizient und zielgenau zu steuern, dass Risiken und unerwünschte Folgewirkungen vermieden und politisch konsenterte Ziele erreicht werden können (Makroebene).

2 Konzeptionelle Grundlagen

Für ein vertieftes Verständnis der Echtzeitsteuerung komplexer soziotechnischer Systeme ist es unumgänglich, sich einiger theoretischer und konzeptioneller Grundlagen zu vergewissern, und zwar insbesondere in dem Bereich Steuerungs- bzw. Governance-Theorie. Auf dieser Grundlage lassen sich Eckpunkte des soziologischen Modells fixieren, das für die Simulationsexperimente verwendet wird (vgl. Kap. 5 und 6).

2.1 Mehrebenen-Modell von Governance

In der Governance-Forschung gibt es bislang keinen Konsens darüber, wie soziale Systeme funktionieren und wie sie auf steuernde Eingriffe von außen reagieren (Grande 2012). Bisweilen gibt es sogar eine gewisse Skepsis, ob komplexe Systeme überhaupt steuerbar sind (Luhmann 1997).

Andererseits ist die Notwendigkeit zu steuern kaum zu bestreiten, vor allem vor dem Hintergrund erheblicher gesellschaftlicher Risiken wie beispielsweise dem Verkehrskollaps, den klimaschädlichen CO₂-Emissionen, Hackerangriffen auf IT-Netze oder der Erosion der Privatsphäre in der Datengesellschaft (Grote 2009). Aber auch die nachhaltige Transformation des Verkehrs- oder des Energie-Systems lässt sich ohne gezielte Eingriffe kaum bewältigen (Loorbach 2007).

Wir gehen hier unter Bezug auf Arbeiten von Weyer et al. (2015) davon aus, dass Fragen der Möglichkeit, der Funktionsweise und der Wirksamkeit von Governance nur dann sinnvoll diskutiert werden können, wenn man in der Lage ist, diese Problemstellungen theoretisch zu modellieren und, darauf aufbauend, Zukunftsszenarien zu entwickeln, die sich experimentell überprüfen lassen.

Soziotechnische Systeme

Wir werden im Folgenden mit einem Makro-Mikro-Makro-Modell sozialer bzw. soziotechnischer Systeme arbeiten (siehe dazu Kap. 4.1). Das Modell bildet das Wechselspiel von Handlung und Struktur ab (vgl. Abbildung 1):

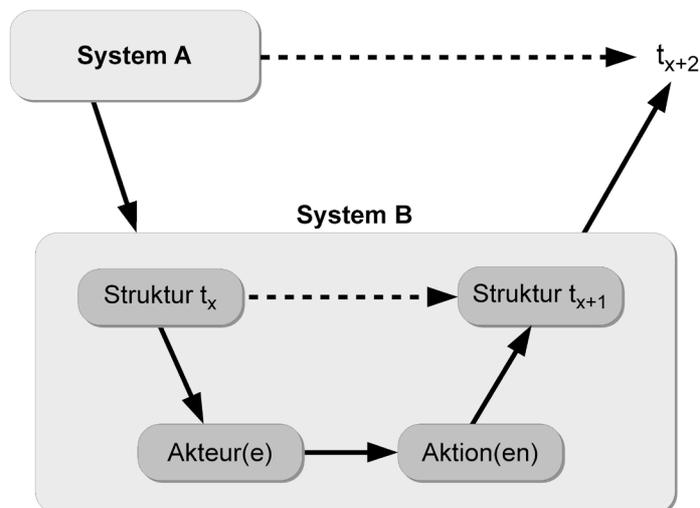


Abbildung 1: Erweitertes Makro-Mikro-Makro-Modell (Esser 1993, S. 98)

Dieses Modell enthält im Wesentlichen drei Mechanismen (dargestellt als durchgezogene schwarze Pfeile):

1. Ausgangspunkt ist die Systemstruktur (in System B) zum Zeitpunkt t_x , die von Akteuren als situationaler Kontext wahrgenommen wird, der ihren Handlungsspielraum eingrenzt.
2. Diese Akteure verfolgen individuelle Ziele und treffen ihre Entscheidungen auf Grundlage definierbarer Regeln – z. B. des Prinzips der subjektiven Nutzenmaximierung (Esser 1993). Da eine große Zahl heterogener Akteure auf der Mikroebene agiert und interagiert, ist es kaum möglich vorherzusehen, welche Entscheidungen sie treffen und wie sie sich dabei wechselseitig beeinflussen.
3. Als aggregiertes Resultat all dieser Interaktionen emergiert schließlich eine neue Systemstruktur (von System B) zum Zeitpunkt t_{x+1} , die den Ausgangspunkt für den nächsten Makro-Mikro-Makro-Zyklus bildet.

Die Akteure der Mikroebene werden also durch das System beeinflusst, aber sie gestalten das System der Makro-Ebene mit und verändern es durch ihre Handlungen – und erzeugen auf diese Weise die Systemdynamik (gestrichelter Pfeil). Was sich schließlich als Resultat dieser Prozesse zu den Zeitpunkten t_{x+1} , t_{x+2} usw. ergibt, lässt sich schwer vorhersehen und kann daher nur als das nicht-intentionale Produkt intentionalen Handelns verstanden werden.

Systemsteuerung

Dieses Basis-Modell dient uns als Ausgangspunkt für ein erweitertes Modell, das zusätzlich die Prozesse der Koordination und Steuerung beinhaltet:

- Unter Koordination verstehen wir die Abstimmung unterschiedlicher Akteure mit dem Ziel, einen Konsens in Bezug auf kollektive Problemlösungen zu finden. Dies findet zumeist in Verhandlungen statt, an denen staatliche und nicht-staatliche Akteure teilnehmen, die sich wechselseitig als gleichberechtigte Subjekte anerkennen (Habermas 1981; Mayntz und Scharpf 1995).
- Steuerung meint hingegen den gezielten Eingriff (von System A) in ein anderes System (B), der von einem externen Standpunkt aus erfolgt und von der Intention getragen wird, gezielt Veränderungen im gesteuerten System (A) zu bewirken (vgl. Abbildung 1). Ob ein derartiger Eingriff erfolgreich ist oder nicht, hängt auch davon ab, in welchem Maße die gesteuerten Akteure bereit sind, die externen Impulse zu verarbeiten, oder ob sie sich gar einer Beeinflussung von außen aktiv widersetzen (Mayntz und Scharpf 1995; Willke 1989). Steuerung kann also – ebenso wie Koordination – durchaus misslingen.

Governance

In der Politikwissenschaft ist ein normatives Konzept von Governance weit verbreitet, das unter diesen Begriff neuartige Formen nicht-hierarchischer Koordination unter Einbeziehung staatlicher wie nicht-staatlicher Akteure fasst (vgl. dazu Kooiman et al. 2008; Duit und Galaz 2008; Schultze 2013) – also im Prinzip das beschreibt, was auch schon mit dem Konzept der Policy-Netzwerke beschrieben wurde, in denen gesellschaftliche Lernprozesse stattfinden.

In Abgrenzung dazu verwenden wir die von Weyer et al. (2015) entwickelte Konzeption von Governance, der zufolge dieser Begriff für eine spezifische Kombination der basalen Mechanismen Koordination und Steuerung in einem soziotechnischen Mehrebenen-System steht. Damit postulieren wir, dass ein komplexes System nicht lediglich durch einen einzigen Mechanismus geprägt ist, sondern Koordination und Steuerung auf verschiedenen Ebenen stattfinden, die miteinander verwoben sind und sich wechselseitig beeinflussen.

Um zu verstehen, wie Governance funktioniert, halten wir es daher für erforderlich, den Blick auf das Zusammenspiel unterschiedlicher Mechanismen in einem verschachtelten Mehrebenen-System zu lenken (vgl. Abbildung 2).

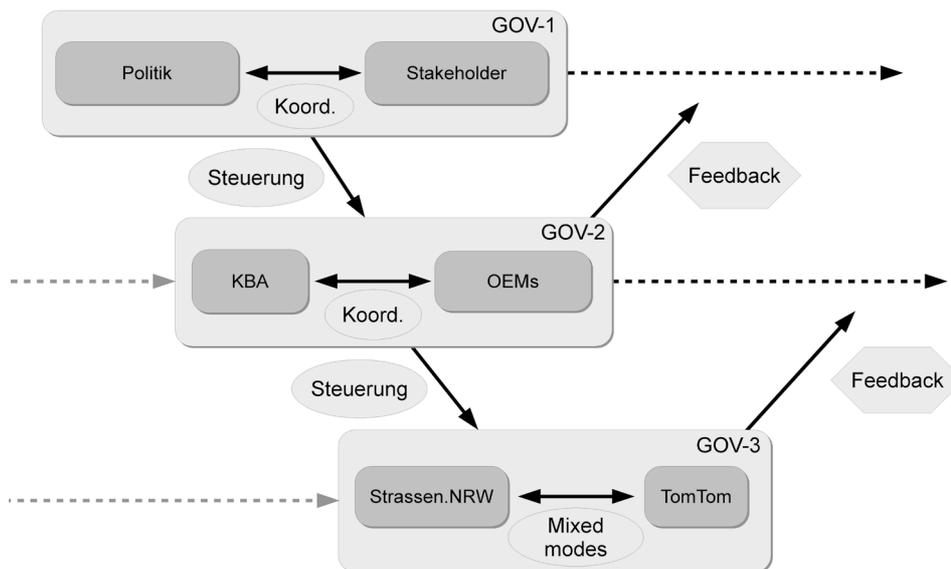


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung eines Mehrebenen-Modells von Governance

Wie in Abbildung 2 am Beispiel des Straßenverkehrs idealtypisch dargestellt, vollzieht sich die Governance moderner Infrastruktursysteme typischer in Form einer Kombination dreier miteinander verknüpfter Ebenen:

- Abstimmungsprozesse in Verhandlungssystemen (GOV-1): Politik, Verbände, Interessengruppen und andere handeln Beschlüsse aus, welche Gestalt die Mobilität der Zukunft annehmen soll (z. B. in Form einer nachhaltigen Transformation) und verständigen sich über Maßnahmen, die ergriffen werden sollen (z. B. Förderung der Elektromobilität);
- Regulierung funktioneller Teilsysteme (GOV-2): Spezielle Instanzen (wie etwa das Umweltbundesamt oder das Kraftfahrt-Bundesamt) werden geschaffen bzw. beauftragt, in Abstimmung mit den relevanten Akteuren aus Wirtschaft und Gesellschaft diese politischen Vorgaben in praktikable Normen und Regeln umzusetzen, die den Betrieb des funktionellen Teilsystems „Straßenverkehr“ ermöglichen;
- Operative Steuerung dieser Teilsysteme (GOV-3): Staatliche (Straßen.NRW, Bundesanstalt für Straßenwesen) wie private Dienstleister (TomTom) entwickeln Mobilitätsangebote, mit deren Hilfe sich der alltägliche Betrieb dieser Teilsysteme operativ bewältigen lässt.

Das hier vorgestellte Mehrebenen-Modell postuliert, dass die Prozesse *innerhalb* der Ebenen wie auch die Interaktion *zwischen* den Ebenen funktionieren müssen, damit sich ein soziotechnisches System in der Praxis erfolgreich bewährt. Von gelungener Governance kann nur dann die Rede sein, wenn das Zusammenspiel unterschiedlicher Ebenen in den Blick gerückt wird und nicht nur Teilbereiche des Gesamtgeschehens in Betracht gezogen werden. Wie genau dies in der Praxis funktioniert und welche Konstellationen möglicherweise leistungsfähiger sind als andere, kann unseres Erachtens nicht auf Basis theoretischer Vorannahmen postuliert, sondern nur durch empirische Forschung herausgefunden werden. Die agentenbasierte Modellierung (ABM) wird daher später (vgl. Kap. 4) als eine Methode vorgestellt, mit Hilfe derer wir komplexe Systeme modellieren und ihr Verhalten in unterschiedlichen Governance-Szenarien simulieren (vgl. Kap. 5 und 6).

2.2 Echtzeitsteuerung

Traditionelle Steuerung

Die meisten soziologischen bzw. politikwissenschaftlichen Konzepte von Steuerung und Governance sind dem traditionellen Planungs- und Steuerungsdenken des 20. Jahrhunderts verhaftet, das eine Sequenzialität von Planen und Handeln unterstellt: Die Planung einer Handlung, deren Implementation und Ausführung sowie die anschließende Evaluation werden in der Regel als räumlich und zeitlich getrennte Schritte betrachtet, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten und von unterschiedlichen Akteuren ausgeführt werden, die zudem unterschiedlichen Handlungslogiken folgen. Man denke an die Taylorisierung der Arbeit (Ruiner und Wilkesmann 2016), die sozialistische Planwirtschaft (Jung et al. 1977) oder den Betrieb hochautomatisierter Systeme in der Luftfahrt (Weyer 2008, 2016). In allen Fällen findet die Planung *vor* der eigentlichen Handlung statt und wird von planenden Akteuren vorgenommen, die an der eigentlichen Ausführung der operativen Handlungen nicht beteiligt sind. Die Ingenieure, die ein modernes Flugzeug entwerfen, legen beispielsweise lange vor dessen Betrieb in Form von Software fest, wie es sich in bestimmten Situationen verhalten soll. Die Pilot*innen planen dann den Verlauf eines Flugs im Voraus; aber wie das Flugzeug in bestimmten Situationen agiert bzw. reagiert, ist *vorab* festgelegt.

Echtzeitsysteme

Echtzeitsysteme lösen diese traditionelle Trennung von Planung und Handeln auf, da die Informationen in sehr kurzen Zeiträumen übermittelt werden. Nach Kopetz (2011, S. 2) ist ein Computersystem dann ein Echtzeitsystem, wenn die Korrektheit des Systemverhaltens nicht nur auf logisch richtigen Berechnungen, sondern auch auf der physischen Zeit basiert, zu der die Ergebnisse produziert werden. Für die sinnvolle Nutzung solcher Ergebnisse, beispielsweise in Form von Verkehrsinformationen, ist deren zeitnahe Bereitstellung also entscheidend (Beesch 2018, S. 14).

Die genannten Systeme sind immer Teil eines cyber-physischen Systems, in dem auch Mensch-Maschine-Interaktionen stattfinden. Wenn die Komponenten dieses Systems räumlich getrennt sind, was fast immer der Fall ist, dann müssen die einzelnen Teile zusätzlich durch ein Echtzeitkommunikationsnetzwerk verbunden sein. Sowohl beim menschlichen Operator als auch bei der Datenübermittlung kann es

jedoch zu Verzögerungen kommen. Von erfolgreicher Echtzeit kann daher nur gesprochen werden, wenn ein Computersystem innerhalb der von seiner Umwelt vorgegeben Deadlines operiert und Leistungen abliefert (Beesch 2018, S. 14). Im Gegensatz zu dieser „harten“ Echtzeit liegt eine abgeschwächte Form der „weichen“ Echtzeit vor, wenn die Ergebnisse auch nach Ablauf der Deadline noch einen Nutzen bringen (Kopetz 2011, 2f).

Mobile Echtzeitgesellschaft

In der mobilen Echtzeitgesellschaft verändert sich also die traditionelle Herangehensweise grundlegend: Planung und Steuerung vollziehen sich nahezu simultan – in Echtzeit. Ein zeitlicher Vorlauf ist nicht mehr erforderlich, und die Aktionen sind nicht deterministisch festgelegt, sondern können überraschende, nicht vorhersehbare Wendungen enthalten. Komplexe soziotechnische Systeme, die in der Vergangenheit noch als nicht steuerbar galten, können nunmehr in Echtzeit gesteuert werden (vgl. ausführlich Weyer 2019).

Die technische Grundlage der Echtzeitsteuerung ist die flächendeckende Digitalisierung sämtlicher Bereiche des Lebens und des Arbeitens und die damit einhergehende Verfügbarkeit großer Mengen an Daten, die von smarten, zunehmend mobilen Geräten in Echtzeit erfasst und über Datennetze übermittelt werden. Die Position wie auch die Identität von Personen und Dingen ist so jederzeit und überall verfügbar. Wo wir uns befinden, wenn wir mit unserem Smartphone (oder im smarten Fahrzeug) automatisiert eine Nachricht absetzen oder eine Transaktion tätigen, und wann wir dies tun, sind Daten (bzw. Meta-Daten), auf denen neuartige Geschäftsmodelle wie „Location-based Services“ oder „Behavioural Targeting“ basieren, die individuell maßgeschneiderte Angebote unterbreiten (Christl und Spiekermann 2016; Weyer et al. 2018b).

Hinzu kommt die Rechen-Power leistungsfähiger, hochautomatisierter Computer, die in der Lage sind, aus einer großen Menge von Daten in Echtzeit ein Lagebild zu erzeugen, das in Sequenzen aktualisiert wird, die kürzer als der traditionelle Planungshorizont sind und die kognitiven Fähigkeiten menschlicher Planer überfordern. Beispiele sind das High-Frequency-Trading (Fink 2014), aber auch die Steuerung des Straßenverkehrs durch Anbieter von Mobilitätsdienstleistungen (dazu ausführlich Kap. 3).

Geradezu revolutionär ist die Fähigkeit derartiger Systeme, auf Basis algorithmischer Datenverarbeitung in Echtzeit Handlungsempfehlungen für die Akteure zu generieren und so deren Verhalten zu steuern. Denn die erhobenen Daten werden genutzt, um Muster und Trends zu identifizieren und, darauf basierend, Prognosen zu entwickeln, die dazu beitragen, das Verhalten einzelner Individuen oder ganzer Kollektive in eine gewünschte Richtung zu steuern (Russell 2013).

Diese Fähigkeit zur Echtzeitsteuerung komplexer Systeme ist ein wichtiger Aspekt, der in der Big-Data-Debatte nicht hinreichend betrachtet wird, die weitgehend von – zweifellos relevanten – Themen wie den Risiken für die Privatsphäre des Einzelnen dominiert wird. Mit der Echtzeitsteuerung geht eine Reihe von Veränderungen einher, die im Folgenden beschrieben werden.

Algorithmische Steuerung

Die Analyse des aktuellen Systemzustands wird hochautomatisiert und datengetrieben von Algorithmen getroffen. Das gleiche gilt für die darauf basierenden Entscheidungen. Die Planer in den Zentralen sind daran lediglich in der Form beteiligt, dass sie die Systeme am Laufen halten und vorab die entsprechenden Algorithmen konzipieren und implementieren. Doch die Algorithmen agieren nicht nach einem – zeitlich vorab – festgelegten Plan, sondern passen sich ad hoc und adaptiv an die jeweilige Situation (auf den Finanzmärkten, im Straßenverkehr etc.) an, so dass auch für die Planer kaum antizipierbar ist, warum welche Entscheidung zu welchem Zeitpunkt getroffen wird.

Die Echtzeitgesellschaft bringt also eine neue Qualität der Steuerung komplexer soziotechnischer Systeme mit sich. Auch in früheren Zeiten wurden Daten genutzt, um Wissen zu generieren, das zur Steuerung sozialer Systeme verwendet wurde. Man denke etwa an die periodischen Volkszählungen. Aber diese Verfahren waren langwierig, und die Analysen waren zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung oftmals veraltet. Die Echtzeitgesellschaft eröffnet Potenziale, die weit über die traditioneller Verfahren hinausgehen.

Beschleunigung

Die algorithmische Steuerung trägt zu der enormen Beschleunigung unseres Lebens und Arbeitens bei (Rosa 2005). Planungsprozesse, die zuvor Tage oder Wochen in Anspruch genommen haben, werden nunmehr in wenigen Minuten oder gar Sekunden durchgeführt. Planung und Handlung geschehen somit nahezu simultan und nicht mehr sequenziell. Dies gilt insbesondere für den Nutzer derartiger Systeme, also die Broker an den Finanzmärkten (Knorr Cetina und Preda 2004) oder die Nutzer von Navigationssystemen im Auto oder in öffentlichen Verkehrsmitteln. Ein unvorhergesehenes Ereignis (Stau, Zugverspätung etc.) macht eine sofortige und weitgehend datengetriebene Umplanung möglich, deren Logik sich dem Akteur nicht erschließen muss, da die dahinterstehenden Prozesse unsichtbar bleiben.

Wechselseitige Adaption

System und Akteur passen sich also in einem iterativen Prozess wechselseitig adaptiv aneinander an. Ein veränderter Systemzustand führt zu Informationen, die zu einem veränderten Verhalten der Akteure führen, das wiederum als aggregierten Effekt einen neuen Systemzustand produziert – und dies alles geschieht innerhalb von Zeiträumen, die so kurz sind, dass eine traditionelle Planung kaum noch möglich ist.

Beherrschbarkeit

Dies führt allerdings zu der Frage, ob es noch eine Instanz gibt, die in der Lage ist, die Prozesse zu verstehen bzw. zu beherrschen. Wird der einzelne Nutzer das Geschehen noch durchschauen bzw. die Logik verstehen, die hinter den steuernden Signalen steht? Wer hat noch die Kontrolle, wenn Algorithmen komplexe soziotechnische Systeme steuern, wenn die Prozesse hochautomatisiert und in sehr kurzen Zeiträumen ablaufen und sich die Systemzustände in einer kaum reproduzierbaren Weise

permanent dynamisch ändern? Und wer ist in der Lage, krisenhafte Zuspitzungen (wie etwa in Form „automatischer“ Börsen-Crashes) zu vermeiden?¹

Das Beispiel der Verkehrssteuerung zeigt, dass die Echtzeitsteuerung überraschend gut funktioniert bzw. dass sie zumindest leistungsfähiger ist als traditionelle Formen der zentralen Steuerung, die in der Regel nicht in der Lage waren, die Nutzerin beispielsweise mit hinreichenden Informationen über alternative Routen zu versorgen oder im Fall von Störungen in das System zu intervenieren und gezielt gegenzusteuern (vgl. Kap. 4).

Aber unser Wissen über die Funktionsweise von Echtzeitsteuerung und die Parameter, die sie zum Erfolg (bzw. zum Scheitern) führen, ist noch unterentwickelt. Zudem mangelt es in der sozial- und politikwissenschaftlichen Forschung an Konzepten und Modellen zur Beschreibung dieses qualitativ neuartigen Governance-Modus. Dienstleister wie TomTom oder Google Maps sind offenbar längst weiter als die akademische Governance-Forschung. Sie sind technisch in der Lage, komplexe Systeme in Echtzeit zu steuern, aber sie haben selbst nur ansatzweise einen Begriff davon, was sie dort tun (Experteninterview TomTom 18.06.2018).

2.3 Modellierung von Echtzeitsteuerung

Smart Governance

Die Echtzeitsteuerung komplexer soziotechnischer Systeme basiert darauf, dass die Abfolge von Datengenerierung, Datenauswertung und Systemsteuerung sich iterativ in sehr kurzen Zyklen vollzieht. Zudem kommt ein neuartiger Modus von „Smart Governance“ (Willke 2007) zum Einsatz, der sich als die zentrale Steuerung dezentraler Systeme beschreiben lässt (Rochlin 1997; Weyer 2014) – eine Kombination, die als nahezu undenkbar galt und in der politikwissenschaftlichen Governance-Literatur bislang nicht beschrieben ist (vgl. zusammenfassend Weyer et al. 2015).

Mit der Echtzeitsteuerung wird es erstmals möglich, dezentrale Systeme, in denen die Individuen autonome Entscheidungen treffen, zentral zu steuern, ohne der Hybris früherer planwirtschaftlicher Konzepte anheimzufallen, das Verhalten sämtlicher Systemkomponenten im Detail steuern zu wollen. Das Konzept verknüpft vielmehr die zentralistische Planung mit der dezentralen Selbstorganisation: Es belässt den Individuen die freie Entscheidung, zwischen unterschiedlichen Handlungsalternativen zu wählen (also ihr lokales Optimum zu finden), aber beeinflusst deren Entscheidungsspielräume in einer Weise, die auf eine Optimierung des Gesamtsystems, also auf ein globales Optimum abzielt.

Die Autonomie des einzelnen Individuums wird damit nicht so stark eingeschränkt wie in klassischen Hierarchien – auch wenn sich die Handlungsspielräume zweifellos verengen dürften. Die Entscheidungskompetenz der dezentral verteilten Komponenten bleibt nämlich erhalten – allerdings im Rahmen eines digital konstruierten Systemzustands, der von Algorithmen in Echtzeit erzeugt (und permanent verändert)

¹ Dies wirft die Frage nach Möglichkeiten der politischen Gestaltung und Steuerung der Echtzeitgesellschaft auf (Weyer 2019).

wird und damit die Wahrnehmung möglicher Handlungsoptionen entscheidend prägt.

Das in Kapitel 2.1 beschriebene Makro-Mikro-Makro-Modell eignet sich somit gut, um die hier beschriebenen Prozesse soziologisch zu modellieren. Zudem erlaubt es die Computersimulation (vgl. Kap. 5), das Wechselspiel von System und Akteur in hoher Geschwindigkeit ablaufen zu lassen, also die Prozesse der Echtzeitsteuerung simulativ abzubilden.

Smart Agents

Die Modellierung der Agenten muss der Verschiebung von sequenzieller zu simultaner Planung Rechnung tragen. Im Kontext der Echtzeitsteuerung ist eine langfristige Vorabplanung von Routen (beispielsweise am Tag zuvor mithilfe von Straßenkarten) nicht mehr erforderlich, da das Navigationssystem eine Ad-hoc-Planung erlaubt, die simultan während der Fahrt erfolgen kann. Die Prozesse laufen also automatisiert und hochgradig verdichtet und erfordern keine menschlichen Eingriffe bzw. planerischen Aktivitäten mehr.

Im Modus der Echtzeitsteuerung reagiert das einzelne Individuum kurzfristig auf den aktuellen Systemzustand und richtet seine Entscheidungen an den aktuellen Gegebenheiten aus, ohne jedoch über ein komplettes Lagebild zu verfügen und ohne einen (konventionell erstellten) Alternativplan verfügbar zu haben, der im Falle von Störungen, Irritationen, Systemausfällen etc. hilfreich sein könnte.

Die agentenbasierte Modellierung (ABM) komplexer Systeme ist in der Lage, das Handeln von Agenten im Modus der Echtzeitsteuerung abzubilden, vor allem wenn die Agenten angesichts kurzer Vorwarnzeiten und knapper Zeitintervalle den vom System verbreiteten Empfehlungen mehr oder minder „blind“ folgen. Die softwaretechnische Implementation dieses Modus der Echtzeitsteuerung setzt lediglich voraus, dass die einzelnen Agenten in der Lage sind, Situationsparameter in ihr Kalkül einzubeziehen – was zu den „Basics“ von ABM gehört. Sie setzt zudem voraus, dass die globalen Informationen, über die die Systemzentrale verfügt, den Agenten in geeigneter Weise kommuniziert werden (also eine Navigations-Funktion implementiert wird).

Weit schwieriger ist es, Agenten zu konstruieren, die – in traditioneller Manier – eigene Pläne verfolgen oder alternative Optionen in Erwägung ziehen. Hier kommen uns zwei theoretische Überlegungen zur Hilfe, die es ermöglichen, unterschiedliche Agententypen zu implementieren: Zum einen spielt der Faktor „Vertrauen in Technik“ eine wichtige Rolle (Cepera et al. 2019): Agenten, die ein hohes Vertrauen in das System haben, werden eher bereit sein, Entscheidungen an ein technisches Gerät (z. B. ihr Navigationsgerät) zu delegieren und den aktuellen Empfehlungen „blind“ und ohne Zeitverzug zu folgen, also im Echtzeit-Modus zu operieren. Und umgekehrt: Misstrauen (z. B. aufgrund schlechter Erfahrungen) kann dazu führen, die Systeme nicht zu nutzen und stattdessen eigene Pläne zu verfolgen (Manzey 2008).²

² Wir vermuten (müssen es aber experimentell überprüfen), dass Echtzeitsteuerung ohne ein Mindestmaß an Vertrauen nicht funktionieren wird.

Die zweite theoretische Überlegung speist sich aus dem Modell der Frame-Selektion (Kroneberg 2005; Tversky und Kahnemann 1981). Sie hilft zu verstehen, warum sich unterschiedliche Agententypen in vergleichbaren Situationen unterschiedlich verhalten. Demzufolge gibt es fest verankerte mentale Modelle von Situationen („Frames“), die das Handeln der Akteure solange maßgeblich prägen, wie sie sicher sind, dass der Frame der aktuellen Situation angemessen ist. Ein Beispiel wäre: „Ich fahre immer mit dem Auto zur Arbeit und nehme immer die gleiche Route.“ Ein Akteur, der diesen Frame gewählt hat, wird in der Regel automatisch-spontan bestimmte Handlungen wählen, es sei denn, ein Ereignis veranlasst ihn dazu, den Frame zu wechseln und/oder seine Handlungswahl rational-kalkulierend zu überdenken.

Das Modell der Frame-Selektion ermöglicht uns somit, zwei grundlegende Agententypen zu implementieren:

- Agenten, die im Echtzeit-Modus operieren, also automatisch-spontan den Empfehlungen des Systems folgen und „blind“ das tun, was ihnen empfohlen wird,
- Agenten, die im traditionellen Planungs-Modus operieren, also ohne situative Abwägung alternativer Optionen ihren vorab gefassten Plan ausführen und die Empfehlungen des Systems ignorieren.

Die computergestützte Modellierung sozialer Agenten auf Basis soziologischer Handlungstheorien (vgl. Kap. 5) ermöglicht es, diese vielschichtigen Facetten des Akteurhandelns zu berücksichtigen und so realistische Modelle zu entwickeln, softwaretechnisch zu implementieren und aus den Experimenten Schlussfolgerungen über die Möglichkeiten und Grenzen von Echtzeitsteuerung zu ziehen.

Mehrebenen-Modell

Eine komplette Modellierung des in Kap. 2.1 beschriebenen Mehrebenen-Modells setzt voraus, sowohl die Abstimmungsprozesse in Verhandlungssystemen (GOV-1) als auch die Regulierung funktioneller Teilsysteme (GOV-2) sowie deren operative Steuerung (GOV-3) modellhaft abzubilden. Das in den Kapiteln 5 und 6 verwendete Simulations-Framework SimCo klammert die Prozesse auf der Politikebene (GOV-1) aus und spielt die Beschlüsse, die hier gefasst werden (z. B. zur Reduktion der CO₂ Emissionen), als externe Parameter in das Modell ein. Unser Modell konzentriert sich auf die regulativen Aktivitäten (GOV-2) und deren praktische Umsetzung in der operativen Verkehrssteuerung (GOV-3). Insofern liegt der Akzent des Modells in der hier vorliegenden Version auf der operativen Steuerung und den Governance-Mechanismen, die den operativen Betrieb steuernd beeinflussen.

3 Theorie und Praxis der Verkehrssteuerung

Um zu steuern, braucht man Wissen über das zu steuernde System. Dieses Wissen wird aus Informationen generiert, die wiederum aus Daten gewonnen werden. Es hat sich eingebürgert, die Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung verkehrsbezogener Daten mit dem Begriff „Verkehrstelematik“ zu umschreiben, der sämtliche informations- und kommunikationsbezogene Technologien und Dienste des Verkehrswesens umfasst. Zu unterscheiden sind hier allerdings die Basistechniken von den sogenannten Mehrwertdiensten (Halbritter et al. 2008, 111ff). Die Basistechniken umfassen insbesondere die Messsensorik. Mehrwertdienste dienen der Verkehrssteuerung, benötigen aber funktionierende Basistechniken, um sinnvoll genutzt werden zu können. In Kapitel 3.1 zur Datennutzung werden einige Mehrwertdienste, wie Streckenbeeinflussungsanlagen oder Navigation, beschrieben. Nicht alle fahrzeugseitigen I&K-Systeme werden für die Verkehrssteuerung verwendet. Beispielsweise dient die Sensorik (Temperaturfühler, Abgassensor) lediglich dem Betrieb der Fahrzeuge. Auch Fahrerassistenzsysteme sammeln zwar fahrzeugbezogene Daten und verarbeiten diese, produzieren damit aber keinen Mehrwert für das Gesamtsystem³.

Im weiteren Verlauf der Studie soll der straßengebundene mobile Individualverkehr (MIV) im Vordergrund stehen, der am Personenverkehr mit 82% den höchsten Anteil hat (Statistisches Bundesamt (destatis) 2017, S. 599). Die Relevanz der Straße als Mobilitätsfaktor wird ferner durch die Verkehrsbelastung der deutschen Autobahnen untermauert. Während diese 1970 bei knapp über 22.000 Kfz pro Tag lag, stieg sie bis zum Jahr 2000 auf über 47.800 Kfz pro Tag an und lag 2016 schon über 51.000 Kfz pro Tag (Keller und Zackor 2008; BMVI 2017). Dieser Anstieg geht natürlich auch mit erhöhtem Staurisiko einher.

Die Nutzung großer, in Echtzeit generierter Datenmengen bietet daher die Chance, den Verkehr intelligent zu steuern und zu lenken. Welche Aspekte der Telematik für die Steuerung des Straßenverkehrs relevant sind, soll im Folgenden betrachtet werden.

3.1 Datenerfassung und -nutzung im Verkehrswesen

Eine der bekanntesten Telematiktechnologien ist die *Induktionsschleife*, die als Kontaktgeber auch vor Ampeln verbaut wird. Über die Erfassung des Magnetfeldes werden Anzahl und Art der Fahrzeuge (Pkw/Lkw) gezählt (Siemens AG 2017, S. 27). Die Genauigkeit der Zählungen ist der große Vorteil dieser Technik, ihr größter Nachteil hingegen, dass sie aufgrund des benötigten Stromanschlusses nicht überall verbaut werden kann (Experteninterview BAST 08.08.2018). Daneben existieren weitere Datenerfassungstechniken.

³ Untersuchungen zeigen die Daten-Sammelwut der Automobilhersteller, die u.a. die Anzahl der Gurtstraffungen speichern, woraus Rückschlüsse auf das Fahrverhalten möglich sind (ADAC 2016). Nach bisherigem Kenntnisstand werden diese Daten jedoch (noch) nicht zur Steuerung des Verkehrs verwendet. Eine Ausnahme sind GPS-Standortdaten fest im Fahrzeug installierter Navigationsgeräte.

Datenerfassung

Radartechnik wird zur kontaktlosen Verkehrsdatenerfassung und Verkehrszählung verwendet. Der Vorteil von über der Fahrbahn installierten Radar-Sensoren besteht darin, dass keine Arbeiten an der Fahrbahn vorgenommen werden müssen. *Laserdetektoren* bieten ähnliche Vorteile und lassen vergleichbare Anwendungen zu. Eine neuere Alternative zu Induktionsschleifen sind Passiv-Infrarot-Detektoren, die die Fahrzeuge über deren Wärmebild erfassen. *Drucksensoren* in der Fahrbahn (Weigh-in-Motion-Systeme) werden zur Verkehrszählung bei gleichzeitiger Erfassung von Fahrzeugklasse, Geschwindigkeit, Achsenabstand, Fahrzeugabstand etc. verwendet. In Verbindung mit KI-Anwendungen oder „machine learning“ werden *Kameras* in Zukunft eine wichtigere Rolle einnehmen, da mit ihrer Hilfe ebenfalls die Fahrzeugklasse und andere Daten ermittelt werden können (Halbritter et al. 2008, S. 115). Seit den 2000er Jahren wurden weitere Verfahren entwickelt. Neue *Magnetfelddetektoren* sind, im Gegensatz zur Induktionsschleife, mit drahtlosen Sendern ausgestattet und deutlich einfacher zu installieren, was ihre Anwendungsmöglichkeiten erweitert. Auch *Bluetooth-Scanner* liefern Verkehrsdaten, indem sie die ID der sich in vorbeifahrenden Fahrzeugen befindlichen Geräte auslesen, diese an anderer Stelle wiederfinden und so Reisedaten ermitteln (Siemens AG 2017, S. 27).

Die genannten Datenerfassungstechniken ermöglichen es, zuverlässige Prognosen über Verkehrsstärke und -fluss zu generieren. Ergänzt wird dies unter anderem durch Wetterdaten, die in Deutschland durch das *Straßenzustands- und Wetterinformationssystem* (SWIS) zur Verfügung gestellt werden (Halbritter et al. 2008, S. 115).

Neben dieser fest installierten Messsensorik werden Daten auch über „*Floating Car Data*“ und „*Floating Phone Data*“ erhoben (Experteninterview TomTom 18.06.2018). Fahrzeuge mit Ortungstechnik beziehungsweise mitgeführte Smartphones liefern so nicht nur Informationen über ihre Position, sondern auch über ihre Geschwindigkeit. 77 Prozent der deutschen Autofahrer nutzen bereits ein Navigationsgerät, eine Smartphone-App oder Web-basierte Dienste für Routeninformationen (Commerz Finanz 2015). Um mithilfe dieser Geräte Daten zu generieren und den Verkehrsteilnehmern individuelle Informationen zukommen zu lassen, greift man auf die satellitengestützte Positionsbestimmung zurück. Neben dem weit verbreiteten US-amerikanischen Global-Positioning-System (GPS) gibt es das russische Global Navigation Satellite System (GLONASS), das chinesische BeiDou Global Navigation Satellite System, sowie das europäische *Satellitennavigationssystem* GALILEO (Teunissen und Montenbruck 2017). Mittlerweile erreichen diese Systeme eine Genauigkeit von wenigen Metern (Neukirchner 2010, S. 194). So kann die Position eines Nutzers präzise bestimmt werden, und es können auf Basis der aggregierten Daten Prognosen erstellt werden. Mit Standortdaten des Global System for Mobile Communications (GSM) liefern Mobiltelefone ebenfalls hohe Mengen an Verkehrsdaten (siehe dazu Kapitel 3.5). Allerdings sind fest installierte Technologien wie Induktionsschleifen anderen Datenquellen (z. B. Floating Car Data) derzeit noch überlegen, da eine exakte Zählung und die Erfassung des Typs (Pkw/Lkw) von Fahrzeugen möglich ist (Experteninterview BAST 08.08.2018). GPS-basierte Geschwindigkeitsdaten können zwar besser sein, müssen dafür jedoch in genügend hoher Dichte vorliegen, was eine flächendeckende Anwendung erschwert (TomTom 2009, S. 3).

Diese Daten reichen zudem nicht aus, um daraus die Notwendigkeit steuernder Eingriffe abzuleiten; dazu sind weitere Informationen insbesondere zur Verkehrsdichte und -stärke erforderlich (siehe Fundamentaldiagramm in Kapitel 3.2).

Eine effiziente Verkehrssteuerung benötigt neben Daten zum Verkehrsaufkommen auch aktuelle Informationen über den Zustand des Straßennetzes, etwa in Form von digitalen Karten. Zusammen mit den oben genannten Standortdaten sind dadurch individuelle Empfehlungen möglich. Veränderungen von Strecken sind meldepflichtig (z. B. Sperrungen, Verkehrsunfälle, Überlastung von Fernstraßen, außergewöhnliche und örtlich begrenzte Witterungsverhältnisse, Naturkatastrophen) und müssen von den zuständigen Behörden an die Landes- bzw. Bundesmeldestelle gemeldet werden, je nachdem, auf welches Gebiet sie sich auswirken. Unterschieden wird hier zwischen unvorhersehbaren (akuten) Ereignissen wie Unfällen oder Betriebsstörungen und vorhersehbaren Ereignissen wie Bauarbeiten oder Veranstaltungen (Hessen Mobil 2014, S. 17). Ferner spielen sogenannte *journalistische Daten*, wie etwa Verkehrsmeldungen und -warnungen im Radio, eine Rolle; dies sind bereits aufbereitete Meldungen über die Verkehrslage, die beispielsweise auf den Mitteilungen der Landesmeldestelle NRW basieren (Experteninterview TomTom 18.06.2018).

Wenn die Daten aus diesen verschiedenen Quellen kombiniert werden, steigt die Genauigkeit der Verkehrsinformationen. Mittlerweile gilt ein genaues, zeitnah aktualisiertes Verkehrs-Lagebild als selbstverständlich.

Datennutzung

Die öffentliche Hand, also Kommunen, Länder und der Bund, nutzt die Lagebilder, um Verkehrsmeldungen herauszugeben (beispielsweise über Radiosender). Gebündelt werden diese Aktivitäten in der jeweiligen Landesmeldestelle oder der Bundesmeldestelle, die den Verkehrswarndienst betreibt. Bei der Lenkung des Verkehrs wird die *Streckenbeeinflussung* von der *Netzbeeinflussung* unterschieden. Telematikanwendungen wie etwa variable *Wechselverkehrszeichen* oder Anzeigetafeln für Stauwarnungen dienen der Streckenbeeinflussung. Geschwindigkeitsbeschränkungen, die anhand der gesammelten Daten zentral gesteuert werden, sorgen gleichfalls für einen besseren Verkehrsfluss.

Mithilfe der Informationen, die auf Anzeigetafeln angezeigt werden, lassen sich ebenfalls Verkehrsströme lenken und so Netzbeeinflussung betreiben, um Staus im Vorhinein zu vermeiden bzw. abzuschwächen. *Zuflussregelungsanlagen*, also Ampeln an Autobahnauffahrten, können in Spitzenzeiten die Störungen durch auffahrende Fahrzeuge reduzieren. Die *Temporäre Seitenstreifennutzung* hingegen erhöht zeitweise die Kapazität der Strecke. Da Seitenstreifen der Sicherheit dienen, muss abgewogen werden, an welchen Streckenabschnitten diese Maßnahme sinnvoll ist, z. B. wenn Staus dort häufiger Unfälle zur Folge haben (Halbritter et al. 2008, S. 142).

Die Verkehrsteilnehmer erhalten auch individuell die zentral ausgewerteten Informationen, etwa über Staus, und können dezentral entscheiden, sich entsprechend zu

orientieren.⁴ Kanäle zur Verbreitung der Informationen sind der Verkehrsfunk oder webbasierte Dienste wie Google Maps.

Darüber hinaus nutzen viele Verkehrsteilnehmer heutzutage verstärkt dynamische Navigations- und Zielführungssysteme wie etwa Google Maps, TomTom oder Apple Karten – entweder als Smartphone-App, über ein portables oder ein fest installiertes Gerät (letztere bezeichnet man als In-Dash-Geräte).⁵ Mit deren Hilfe wird der Fahrer eines Fahrzeugs zu einem vorher festgelegten Ziel navigiert, wobei ihm (je nach Aktualität bzw. Aktualisierungsrate der gespeicherten Streckendaten) aktuelle Informationen über das Straßennetz und dessen Auslastung bereitgestellt werden (Halbritter et al. 2008, 144f). Diese Dynamisierung der Zielführung berücksichtigt heute auch Umweltereignisse (Nebel) und Verkehrsinformationen (Staus, Straßensperrungen) (Kleine-Besten et al. 2015, 1049f).

Für die Strecken- oder Netzbeeinflussung sind die Floating-Car-Daten der In-Dash-Geräte oder der Smartphone-Apps jedoch nur bedingt geeignet. Ein Pilotversuch des ADAC mit Floating-Car-Daten⁶ kam allerdings zu dem Ergebnis, dass sich diese Daten durchaus zur Verdichtung der vorhandenen Datenlage oder als Ersatz bei Ausfall der festinstallierten Messtechnik eignen (Krampe et al. 2014, S. 504). Eine echte Alternative zu Zählschleifen o. ä. stellen die Floating-Car-Daten offenbar noch nicht dar (Experteninterview BASt 08.08.2018).

3.2 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses

Auf Basis der erfassten Verkehrsdaten ist es möglich, die aktuelle Verkehrssituation darzustellen und die künftige Entwicklung zu prognostizieren, was die Reisegeschwindigkeit auf bestimmten Streckenabschnitten und damit auch die voraussichtliche individuelle Reisedauer einzelner Verkehrsteilnehmer umfasst.

Die Verkehrslage lässt sich aus dem Zusammenwirken von Verkehrsfluss und Auslastung modellieren, was in der Regel in Form des Fundamentaldiagramms des Verkehrsflusses dargestellt wird. Dieser Begriff geht auf Haight (1963) zurück, der das „basic diagram of traffic“ entwarf, das seitdem mehrfach weiterentwickelt und verfeinert worden ist und damit sehr genaue Prognosen ermöglicht. Das Fundamentaldiagramm ist ein integrativer Ansatz, der sowohl die Geschwindigkeit als auch den Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte berücksichtigt und eine Darstellung unterschiedlicher Verkehrslagen zulässt (Gerlough und Huber 1975, S. 55).

⁴ Zur Beeinflussung des Verkehrs in Städten gibt es zurzeit das Projekt SOCRATES 2.0, welches in Kapitel 3.4 näher erläutert wird.

⁵ In vielen In-Dash-Geräten, auch denen der OEMs, wird Technologie von TomTom verwendet (Experteninterview TomTom 18.06.2018).

⁶ Der ADAC sammelt Floating-Car-Daten mit der StauScanner-App, vorausgesetzt, die Nutzer erteilen die Erlaubnis, Geschwindigkeiten und Positionen zu erheben (ADAC o. J.).

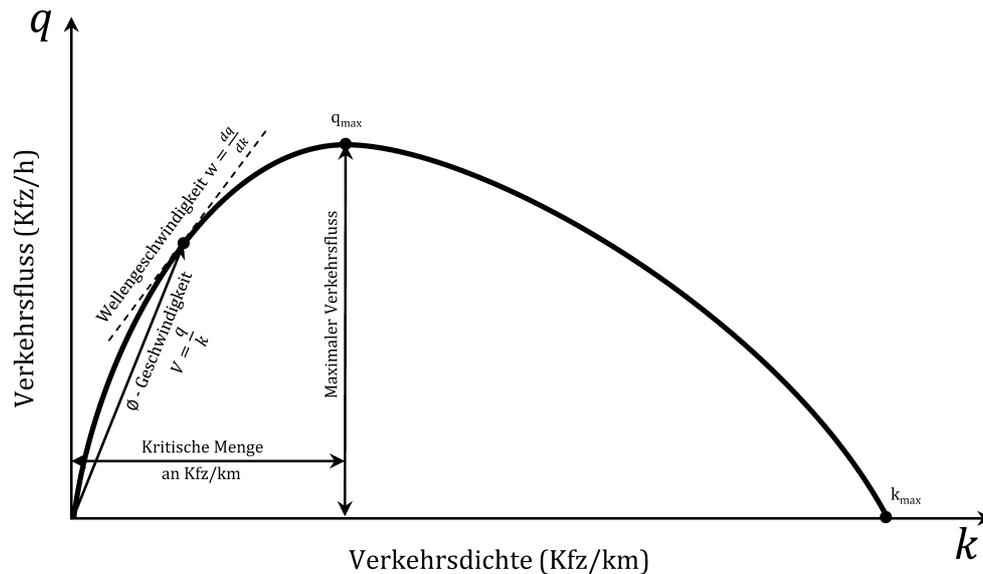


Abbildung 3: Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses (Eigene Darstellung in Anlehnung an Gerlough und Huber 1975, S. 58)

Abbildung 3 zeigt eine einfache, an die Ursprungsversion von Haight (nach Gerlough und Huber) angelehnte Version des Fundamentaldiagramms, die später auch für unser Modell verwendet werden soll. Dargestellt sind die Verkehrsdichte auf der x-Achse, also die Anzahl der Fahrzeuge pro Streckenabschnitt (hier 1 km), und der Verkehrsfluss, auch Verkehrsstärke genannt, auf der y-Achse, also die Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit (hier eine Stunde). Je nach Beschaffenheit der jeweiligen Strecke ergibt sich ein anderes Fundamentaldiagramm. Entscheidende Faktoren sind die Anzahl der Fahrspuren, aber auch Straßenbelag, Steigung, Kurven sowie weitere Eigenschaften einer Straße. Denkbar ist zum Beispiel, dass starke Steigungen oder scharfe Kurven die Geschwindigkeit reduzieren, die auf der betreffenden Strecke gefahren werden kann. Dies hat dementsprechende Auswirkungen auf die Kapazität der Strecke. Daraus ergibt sich für jede Straße ein eigenes Fundamentaldiagramm, welches grundsätzlich aber immer dieselbe Struktur aufweist.

Das Diagramm ist auch deshalb weit verbreitet, weil sich verschiedene Kennzahlen leicht ablesen lassen. Da ohne Verkehrsaufkommen (Dichte = 0) kein Verkehrsfluss entsteht, verläuft die Kurve durch den Ursprung. Die Steigung an diesem Punkt gibt die Geschwindigkeit des störungsfreien Verkehrsflusses an (Gerlough und Huber 1975, S. 55). Dies ist die Geschwindigkeit, die sich einstellt, wenn die Verkehrsteilnehmer, unter Berücksichtigung der geltenden Beschränkungen, frei wählen können, wie schnell sie fahren. Die durchschnittliche Geschwindigkeit auf der Strecke lässt sich am Quotienten aus Verkehrsfluss und -dichte $V = \frac{q}{k}$ ablesen. Die Ableitung hingegen ergibt die Wellengeschwindigkeit $w = \frac{dq}{dk}$. Zu interpretieren ist diese als Geschwindigkeit der Stauwelle. Diese bewegt sich entgegen des Verkehrsflusses, was das negative Vorzeichen der Ableitung ab dem Punkt q_{max} erklärt. Ab diesem Punkt ist kein freier Verkehrsfluss mehr möglich und es gilt $w < 0$, also eine Wellenge-

schwindigkeit unter Null. Diese negative Geschwindigkeit beschreibt die Rückwärtsbewegung der Stauwelle.⁷ Von besonderem Interesse ist die Geschwindigkeit auf verschiedenen Abschnitten der Kurve. Diese ist von der Auslastung der Strecke abhängig, und es kann davon ausgegangen werden, dass der Verkehrsfluss bei q_{max} ein Maximum erreicht und dann mit zunehmender Verkehrsdichte abnimmt, bis der Verkehrsfluss bei k_{max} ganz zum Erliegen kommt. Entspricht der Zustand einer Strecke dem Zustand im Punkt k_{max} , herrscht dort totaler Stillstand und die Strecke hat die maximale Dichte erreicht, das heißt die Fahrzeuge stehen mit geringem Abstand auf der Strecke und bewegen sich nicht.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit, wie beschrieben berechnet durch $V = \frac{q}{k}$, sinkt mit dem Verlauf der Kurve kontinuierlich. Im Ursprung, wo ein freier, ungestörter Verkehrsfluss („Free-Flow“) herrscht, ist sie am größten, um dann langsam zu sinken bis zum Punkt q_{max} . Ab diesem Punkt sinkt der Wert der Durchschnittsgeschwindigkeit stärker, da der Verkehrsfluss q im Zähler nicht mehr steigt, die Verkehrsdichte k im Nenner jedoch stetig zunimmt. Der Zustand im Punkt q_{max} ist der mit dem maximalen Verkehrsfluss. Die kritische Menge an Kfz ist bereits erreicht, und die durchschnittliche Geschwindigkeit würde bei zunehmender Dichte stärker sinken. Insgesamt sind aber gerade so viele Fahrzeuge auf der Strecke, dass sie noch gut passieren können. Aufgrund der relativ hohen Dichte und der relativ hohen Durchschnittsgeschwindigkeit in q_{max} ist dies der Zustand mit dem maximalen Verkehrsfluss.

Zusammengefasst lassen sich die Aussagen des Fundamentaldiagramms so ausdrücken: Je mehr Fahrzeuge sich auf der Straße befinden, desto langsamer können sie fahren, bis es bei Kapazitätsüberschreitung schließlich zum Stau kommt und die Geschwindigkeit noch stärker abnimmt. Diese Kernaussage des etablierten Modells soll auch später in unserer Simulation berücksichtigt werden.

3.3 Meilensteine der Verkehrstelematik

Die zunehmende Technisierung hat auch im Verkehrswesen nachhaltige Veränderungen hervorgerufen. Bevor sich für die verwendeten Technologien der Begriff der Verkehrstelematik durchsetzte, sprach man auch von Verkehrsbeeinflussung oder Verkehrsleittechnik (Keller und Zackor 2008, S. 397). Die zunehmende Technisierung dieser Verkehrsbeeinflussung setzte in den 1990er Jahren ein. Damit einher gingen auch hohe Erwartungen an die positive Wirkung der neuen Technologien. Die Hauptziele waren schon damals die Optimierung des Verkehrsflusses, was Verkehrsvermeidung, Stauvermeidung und Lenkung der Verkehrsströme umfasst sowie die Verringerung der Umweltbelastungen (Halbritter et al. 2008, S. 112). Im Folgenden soll ein kurzer Abriss der diesbezüglichen Entwicklungen gegeben werden.

PROMETHEUS

Das von der Europäischen Union geförderte Projekt PROMETHEUS (Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) wurde

⁷ Siehe auch Kapitel 4.1 „Modellierung der Systemdynamik“.

1986 gestartet, lief bis 1994 und hatte drei Ziele. Erstens sollte die verkehrliche Effizienz erhöht werden, und zwar durch Verkürzung der Reisezeiten, später auch durch die Option einer individuellen Zielführung. Zweitens sollte die Umweltbelastung gesenkt und drittens die Sicherheit im Straßenverkehr deutlich erhöht werden.⁸ Ergebnis des PROMETHEUS-Projekts waren zahlreiche technologische Entwicklungen, vor allem im Bereich der Fahrerassistenzsysteme. Ein Beispiel ist das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), das im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurde (Keller und Zackor 2008, 400f).

OLSIM

Das Verkehrsinformationssystem OLSIM ist eine Online-Simulation, die auf realen Verkehrsdaten basiert und seit 2002 zur Steuerung des Verkehrs auf den nordrhein-westfälischen Autobahnen verwendet wurde. Die **OnLine Traffic SIMulation** gab Internet-Nutzern die Möglichkeit, sich über die Seite „www.autobahn.nrw“ vor dem Reiseantritt über die aktuelle und die erwartete Verkehrslage zu informieren. So wurden etwa 200.000 Nutzer täglich erreicht (Weber et al. 2006, S. 296). Grundlage der Simulation ist das Nagel-Schreckenberg-Modell (Nagel und Schreckenberg 1992), das die Methode der zellulären Automaten auf den Straßenverkehr anwendet und nach Optimierungsmöglichkeiten sucht. Es liefert eine Erklärung für scheinbar zufällig auftretende Staus und sucht die Ursache vor allem im Brems- und Anfahrverhalten der Fahrer*innen. Dieses Modell wurde zum BL-Modell (Bremslicht-Modell) weiterentwickelt, welches der OLSIM-Simulation zugrunde liegt.

Als Datenquellen dienten 4.000 Detektoren, vor allem Induktionsschleifen auf den Autobahnen, die Informationen über die Anzahl der Kraftfahrzeuge auf den jeweiligen Strecken lieferten. Darüber hinaus wurden die Daten von 1.800 Wechselverkehrszeichen (z. B. die aktuelle Anzeige der Geschwindigkeitsbeschränkung) sowie Informationen über Baustellen und journalistische Daten in die Simulation eingespeist. Die OLSIM-Simulation war in der Lage, den aktuellen Zustand des Verkehrs darzustellen und zudem Prognosen für einen Zeitraum von 30 bzw. 60 Minuten abzugeben (Weber et al. 2006, 296f). Die Nutzer konnten so Informationen abrufen und ihre Reiseplanung entsprechend anpassen – allerdings vor Reiseantritt und nicht mobil während der Fahrt. In Zeiten vor der weit verbreiteten mobilen Navigation mit dem Smartphone, die erst zwischen 2008 bis 2011 aufkam (siehe Kapitel 3.4, 3.5 und 3.6), war OLSIM ein einzigartiges Tool zur zeitnahen Routenplanung, das von vielen Verkehrsteilnehmer*innen genutzt wurde. Von den Verkehrszentralen wurden Informationen zur Verkehrsvermeidung und -steuerung ebenfalls über das Internetportal verbreitet.

Unter der Internetadresse www.verkehr.nrw können die Informationen heute noch abgerufen werden. Allerdings verwendet das heutige www.verkehr.nrw nicht mehr das OLSIM System, sondern Daten des Anbieter TomTom.⁹

⁸ Die ersten beiden Aspekte werden auch im Simulator SimCo (vgl. Kap. 5.2) als Effizienzkriterien verwendet.

⁹ Information erhalten per Mail, auf Anfrage bei www.verkehr.nrw (24.03.2020).

Ruhrpilot

Der Ruhrpilot wurde 2005 ins Leben gerufen. Der Region Ruhrgebiet, die bereits über eine sehr dichte Straßennetzabdeckung verfügte, die den Ausbau der Infrastruktur erschwerte, sollte damit ein intelligentes System zur Verkehrssteuerung bereitgestellt werden (Gerwin 2008, 56f). In einer Leitstelle sollte eine Datenplattform entstehen, die Daten aus 500 zusätzlichen Messstationen erhält, um auf diese Weise Echtzeitverkehrsinformationen und Prognosen per Radio, Internet, Videotext oder Handy an die Nutzer zu übermitteln (Schreckenberg 2007, S. 94). Die eigenen Ruhrpilot-Messstellen waren Infrarotdetektoren, die die Verkehrsdichte über das Mobilfunknetz (GSM) an die Leitstelle übertragen (Gerwin 2008, S. 57).

Als Weiterentwicklung des Ruhrpiloten waren integrierte Ansätze geplant. Für den ÖPNV sollte das Ticketing übernommen werden und für den Güterverkehr sollten tarifliche Verknüpfungen unterschiedlicher Verkehrsträger, inkl. Buchen und Reservieren (von Anschlusstransporten), realisiert werden (Baltes et al. 2008, S. 22, 32). Das Projekt kam allerdings nie über die Pilotphase hinaus, und der Internetauftritt leitet mittlerweile auf die Seite www.verkehr.nrw weiter. Dies ist vermutlich dem Umstand geschuldet, dass die Verwendung von Echtzeitdaten zwar gute Informationen lieferte, der Top-down-Steuerungsansatz allerdings keinen Mehrwert für die individuellen Akteure im Straßenverkehr lieferte.

3.4 Big Data und Echtzeit im Verkehrswesen

In jüngster Zeit hielt Big Data Einzug in das Verkehrswesen, und zwar in den ÖPNV, den Güterverkehr und insbesondere den Individualverkehr, auf den wir uns fokussieren. Das bereits erläuterte OLSIM System musste ab 2008 mit TomTom und ab 2011 mit Google konkurrieren, die Echtzeitverkehrsinformationen über ihre jeweiligen Services verbreiteten. Dafür sammelte TomTom schon 2009 etwa 1 Milliarde GPS-Datenpunkte (TomTom 2009, S. 3). Diese Zahl dürfte heute bei weitem überschritten sein, sodass eindeutig von Big Data im Verkehrswesen und Navigationsbereich gesprochen werden kann.

Big Data

Häufig findet man in der Diskussion um Big Data die sogenannten drei bzw. vier V's (Weyer et al. 2018b). Für das Verkehrswesen sind grundsätzlich die Big-Data-Faktoren „Volume“ und „Variety“ von Bedeutung. Insbesondere die Harmonisierung von Daten unterschiedlichster Größenordnung, Herkunft und Qualität wie auch die Weitergabe von Verkehrsinformationen an verschiedene Dienstleister können Hürden darstellen, mit denen sich Verkehrsbetriebe befassen müssen.

Da das Verkehrssystem ein komplexes soziotechnisches System ist, das sich dynamisch verändert und dessen Betrieb somit ein gewisses Risiko beinhaltet (Perrow 1987), spielen bei der Verkehrssteuerung auch die Faktoren „Velocity“ und „Veracity“ eine wichtige Rolle. Das Verkehrsnetz verändert sich laufend, z. B. durch Baustellen oder das schwankende Verkehrsaufkommen, aber auch durch wiederkehrende Ereignisse wie Schulferien oder außerordentliche Events wie Konzerte oder Fußballspiele. Die hohe Dynamik sowie die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Daten stellen Herausforderungen dar, mit denen jeglicher Versuch eines

steuernden Eingreifens konfrontiert ist. Die Verlässlichkeit (Veracity) der Daten, etwa zum Verkehrsaufkommen, ist daher ein entscheidender Faktor. Eine Datenquelle allein ist auch nach heutigem Stand der Technologie nicht ausreichend, um diese Genauigkeit zu gewährleisten. Wie bereits erwähnt, liefern fest installierte Induktionsschleifen nach wie vor die genauesten Daten. Sie werden zwar mittlerweile mit Mobilfunkdaten abgeglichen, bilden aber immer noch eine unentbehrliche Grundlage für die Situationsanalyse (Experteninterview BAST 08.08.2018). Fest installierte Messtechnik bleibt demnach vorerst nötig, um genaue Verkehrslagebilder zu erstellen.

Die Echtzeitkomponente (velocity) hat sich mit der Verbreitung mobiler Navigationsgeräte bzw. Smartphone-Apps erheblich gesteigert. Ein Fahrzeug, das sich zwischen zwei Induktionsschleifen befindet, wird von dieser traditionellen Datenerfassungstechnik nicht erfasst. Ein Fahrzeug, das mit einem mobilen Sender ausgestattet ist, speichert hingegen alle fünf Sekunden die Lokationspunkte, also die Position des Fahrzeugs, und überträgt alle zwei Minuten sämtliche relevanten Informationen (Experteninterview TomTom 18.06.2018). Damit ergeben sich auch neue Möglichkeiten der Echtzeitsteuerung des Straßenverkehrs. Wenn eine hinreichende Abdeckung gegeben ist, wenn also ein bestimmter Anteil aller Fahrzeuge über In-Dash-Geräte oder über Smartphone-Apps verfügt, lassen sich Effekte (z. B. die Vermeidung von Staus) nachweisen, von denen *sämtliche* Verkehrsteilnehmer profitieren und nicht nur die Fahrzeuge, die sich an dem Datenübertragungsprozess beteiligen (TomTom 2009, 2010).

SOCRATES 2.0

Das Projekt SOCRATES 2.0 unternimmt den Versuch, in den Straßenverkehr unter Einbindung möglichst aller Akteure steuernd einzugreifen. Träger des Projektes ist die Europäische Kommission in Zusammenarbeit mit Behörden und Unternehmen wie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), BMW und TomTom. Es versteht sich als interaktives Governance-Konzept, das vielfältige Interessen und Informationen bündeln und vereinen soll. Unter dem Begriff des „Interactive Traffic Management“ (TM2.0) zielt es auf die Integration des zentralen Verkehrsmanagements mit den „In-vehicle“-Informationen, welche die Verkehrsteilnehmer über ihre Navigationsgeräte verbreiten bzw. erhalten (Socrates 2.0 2018, S. 1).

Innovativ an dem Konzept ist die Kooperation verschiedener Akteure bei der Bereitstellung und Nutzung der Verkehrs-Informationen. Anders als bei der dynamischen Routenplanung auf Basis von Echtzeitverkehrsinformationen fließen hier weitere, z. B. verkehrsplanerisch motivierte Impulse der beteiligten Akteure ein. Die vom System generierte Routenempfehlung basiert dann nicht mehr ausschließlich auf der aktuellen Verkehrslage, wie sie typischerweise von Navigationsdiensten angeboten wird; das „Smart Routing“ berücksichtigt vielmehr auch weitere Aspekte wie die Optimierung der Netzeffizienz oder öffentliche Interessen wie Verkehrsberuhigung oder Reduktion der Umweltbelastung.

Die Steuerung der Verkehrsteilnehmer*innen könnte dabei über deren Navigationsgeräte erfolgen, die als Medium für die Verbreitung der Echtzeitinformationen fun-

gieren können. „Smart Routing“ soll sowohl individuelle als auch betriebswirtschaftliche und öffentliche Interessen befriedigen: Die individuellen Verkehrsteilnehmer*innen sollen über das „intelligente“ Routing besser an ihre jeweiligen Ziele gebracht werden und die Diffusion von Informationen über die Strecke und die lokale Verkehrslage (Socrates 2.0 2018, S. 2) soll verbessert werden. So soll schließlich auch die Netzeffizienz steigen und ein gemeinwohlförderlicher Effekt eintreten.

Die große Vision des Projektes ist, ein Framework für die Kooperation sämtlicher öffentlicher und privater Stakeholder des Verkehrssystems zu schaffen, insbesondere Nutzer*innen, Straßenbehörden, öffentliche Verkehrsmanagementzentralen, Datenprovider, Serviceprovider und Automobilhersteller (Koller-Matschke 2018, 29ff).

Smartphone

Mit der Einführung des ersten iPhones im Jahr 2007 begann der Siegeszug der Smartphones. Die ersten Apps, die Telematik-Funktionen enthielten, kamen im Jahr 2010 auf den Markt (TomTom 2018a, S. 13). Heute sind die Geräte aus dem Alltag kaum noch wegzudenken, und in Deutschland nutzten 2017 bereits 81% der Menschen ein Smartphone (Bitkom 2018). Sie haben damit mit hoher Wahrscheinlichkeit immer eine Navigations-App (Google Maps oder Apple Karten) griffbereit, da diese auf den meisten Smartphones vorinstalliert sein dürfte. Tatsächlich gaben über 90 Prozent der Befragten einer repräsentativen Studie an Navigations-Apps zu nutzen (Cepera et al. 2019). Für die Verbreitung von Lagebildern des Verkehrs in Echtzeit oder der angesprochenen „In-vehicle“-Informationen eignen sich Smartphones natürlich hervorragend – aber auch als Informationsbroker für den intermodalen Verkehr bzw. alternative Mobilitätsformen wie CarSharing (Geisberger und Broy 2012). Probanden, die ein Smartphone mit Verkehrsinformationen erhielten, reagierten stärker auf tägliche Veränderungen in der benötigten Reisezeit (Tseng et al. 2013, S. 206). Auch über dieses Medium verbreitete Informationen zu den Emissionen verschiedener Transport-Modi sorgten dafür, dass der empfundene Nutzen von emissionsarmen Transportmitteln, wie dem ÖPNV, von Reisenden als höher empfunden wurde (Brazil und Caulfield 2013, S. 100). Daraus lässt sich schließen, dass Smartphones eine große Rolle bei der Verbreitung von Verkehrsinformationen an die Verkehrsteilnehmer spielen (Khoo und Asitha 2016, S. 179). Das Smartphone ist also nicht nur als Medium im Verkehrswesen geeignet, sondern sorgt bei darüber verbreiteten Informationen sogar für eine erhöhte Bereitschaft das Verhalten anzupassen.¹⁰

Die folgenden Fallstudien präsentieren einige Navigations-Dienstleister etwas ausführlicher und orientieren sich dabei am Big-Data-Prozessmodell, das die Verarbeitung großer Datenmengen (z. B. durch einen Navigationsdienstleister) in einem institutionellen Rahmen verortet (vgl. Abbildung 4).

¹⁰ Vgl. dazu auch die Ergebnisse aus Cepera et al. 2019.

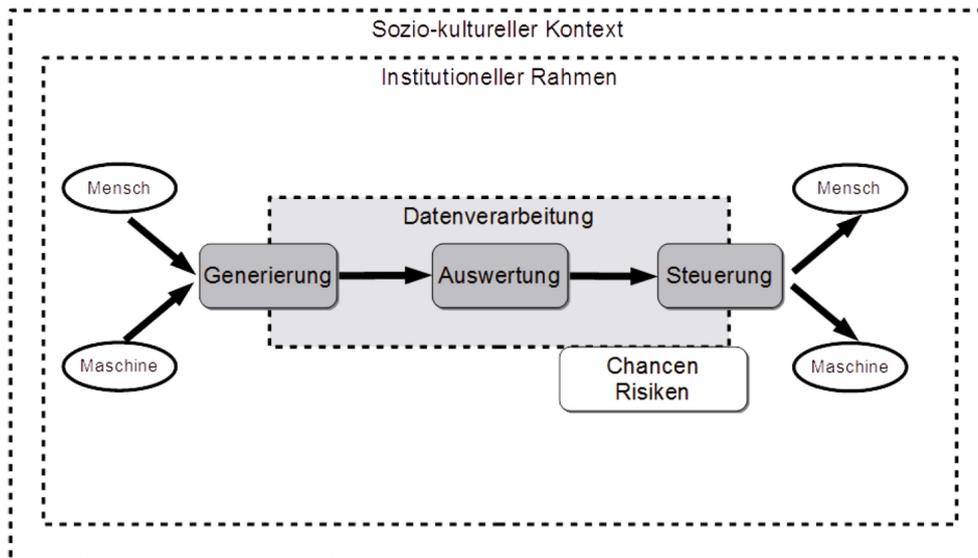


Abbildung 4: Das Big-Data-Prozessmodell. (Weyer et al. 2018b, S. 74)

Diesem Modell zufolge werden die Daten zunächst durch Nutzer*innen (etwa per Selbstvermessung durch eine Smart-Watch) generiert oder durch technische Systeme automatisch ermittelt. Die folgende Auswertung und Aufbereitung der Daten geschehen zum großen Teil automatisch durch Algorithmen. Die so gewonnenen Lagebilder werden in Echtzeit an die betreffenden Personen (bzw. Maschinen) übermittelt. Das Ganze ist in den institutionellen sowie den sozio-kulturellen Kontext eingebettet, die das Handeln der beteiligten Akteure prägen (Weyer et al. 2018b, S. 75).

3.5 TomTom

Ein großer und bekannter Anbieter von Navigationsgeräten und -software ist TomTom. Trotz der Dominanz von Google Maps ist TomTom ein wichtiger Spieler bei Navigationsdiensten, denn das 1991 in den Niederlanden gegründete Unternehmen kooperiert heute unter anderem mit Apple¹¹, Huawei und diversen Fahrzeugherstellern. Es soll daher beispielhaft für die Rolle stehen, die private Unternehmen in der Verkehrssteuerung spielen.

TomTom lässt sich als Serviceprovider für Verkehrsteilnehmer auffassen. Das Portfolio dieses Serviceproviders umfasst allem voran die Satellitennavigation. Diese wurde seit dem Jahr 2004 zunächst über eigene Hardware an Endkunden vertrieben und 2008 um Echtzeitverkehrsinformationen für Deutschland ergänzt. Verkaufsargument der Navigationsgeräte war und ist die Zeitersparnis gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern. Neben diesem bekannten Geschäftsfeld betätigt sich TomTom vor allem in der Telematikdienstleistung für Unternehmen. Mit seinem Service WEB-FLEET verspricht der Anbieter eine vollumfassende Analyse für das Flottenmanage-

¹¹ Die Kooperation läuft voraussichtlich aus, da Apple eigenes Kartenmaterial verwenden will.

ment, indem eine zentrale Plattform die in den Fahrzeugen gesammelten Daten bündelt (TomTom 2018a, S. 15). Insgesamt sind Telematiktechnologien, Datenauswertung und Informationsbereitstellung an die Kunden das Kerngeschäft von TomTom.

Datengenerierung

Das Navigationssystem „IQ-Routes“ von TomTom, das seinen Nutzer*innen Echtzeit-Informationen mittels „HD Traffic“ zur Verfügung stellt, arbeitet mit Daten aus verschiedenen Quellen (TomTom 2009; Experteninterview TomTom 18.06.2018).

Dies sind, wie in Abbildung 5 zu sehen, insbesondere GSM-basierte Floating-Phone-Daten, die mit Hilfe der Timing-Advance-Methode ermittelt werden: Anhand des Abstands eines Mobiltelefons zu Mobilfunk-Basisstationen kann dessen Position trianguliert werden. In urbanen Gebieten mit mehreren parallelen Transportarten müssen zudem die Geräte herausgefiltert werden, die nicht während des Autofahrens benutzt werden.

Die GSM-Daten werden um GPS-Positionsdaten ergänzt, die einerseits die Filterung unterstützen und andererseits dem Abgleich dienen (TomTom 2009, S. 2). Ferner werden weitere Datenquellen berücksichtigt, vor allem journalistische Daten, wie Incident Context Data zu besonderen Vorkommnissen (Unfälle), die beispielsweise von Radiosendern über den Traffic Message Channel (TMC) übermittelt werden, und historische Daten, die es erlauben, eine Verkehrssituation vor dem Hintergrund typischer vergangener Konstellationen (Rushhour Freitagnachmittag) zu bewerten und einzuschätzen.

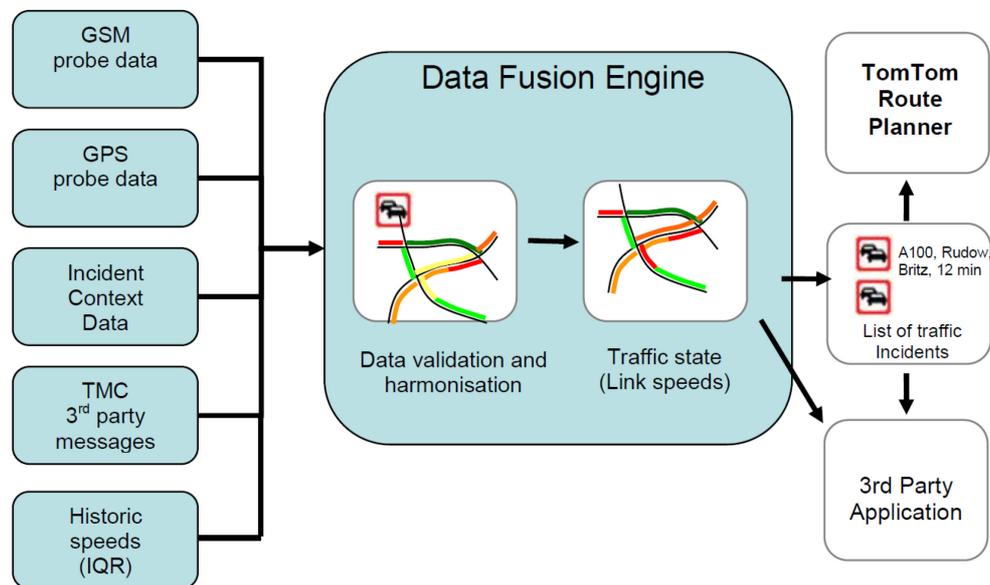


Abbildung 5: Verkehrsdaten und Datenfusion TomTom (TomTom 2009, S. 3)

Um zu einer verlässlichen Aussage über die gefahrenen Geschwindigkeiten, zur sogenannten „Ground-Truth“, zu kommen, sind außerdem die äußerst genauen Messungen von Zählschleifen unerlässlich (TomTom 2009, S. 3). Insgesamt kann man durch die Verknüpfung verschiedener Datenquellen zu verlässlichen Ground-Truth-Daten gelangen.

Datenauswertung

Um das Verkaufsargument (schnellere Route oder Stau-Umfahrung) aufrecht erhalten zu können, ist die effektive Auswertung der gesammelten Daten nötig. Die bereits in Abbildung 5 zu sehende „Data Fusion Engine“ beinhaltet die Algorithmen zur Validierung und Harmonisierung der Daten. Dazu wird vorab die Reliabilität der Daten bewertet: Je nach Vertrauenswürdigkeit, Alter und Anzahl der Messungen wird automatisch ein gewichtetes Ergebnis erzeugt (TomTom 2009, S. 3). Die Ergebnisse der Algorithmen sind „Link speeds“: Für jede Straße (Link) wird der Verkehrszustand ermittelt und in Geschwindigkeiten ausgedrückt. Diese Geschwindigkeiten wiederum werden später genutzt, um die optimale Route zu berechnen oder Meldungen über Verkehrsbeeinträchtigungen herauszugeben.

Die ermittelten Geschwindigkeiten werden in Profilen zusammengefasst. Für Autobahnen und große Straßen können so für jeden Tag der Woche Profile mit Durchschnittsgeschwindigkeiten bereitgestellt werden, die in Fünf-Minuten-Intervallen getaktet sind. In diese Vorab-Bewertung (noch ohne Echtzeitinformationen) einer Strecke gehen allerdings nur die Referenzgeschwindigkeit, typischerweise diejenige des Free-Flows, und das Profil des am besten passenden Tages ein (TomTom 2009, S. 5). Die digitalen Karten mit den hinterlegten Profilen werden dann u.a. in die Routenberechnung der persönlichen Navigationsgeräte einbezogen (TomTom 2009, S. 6).

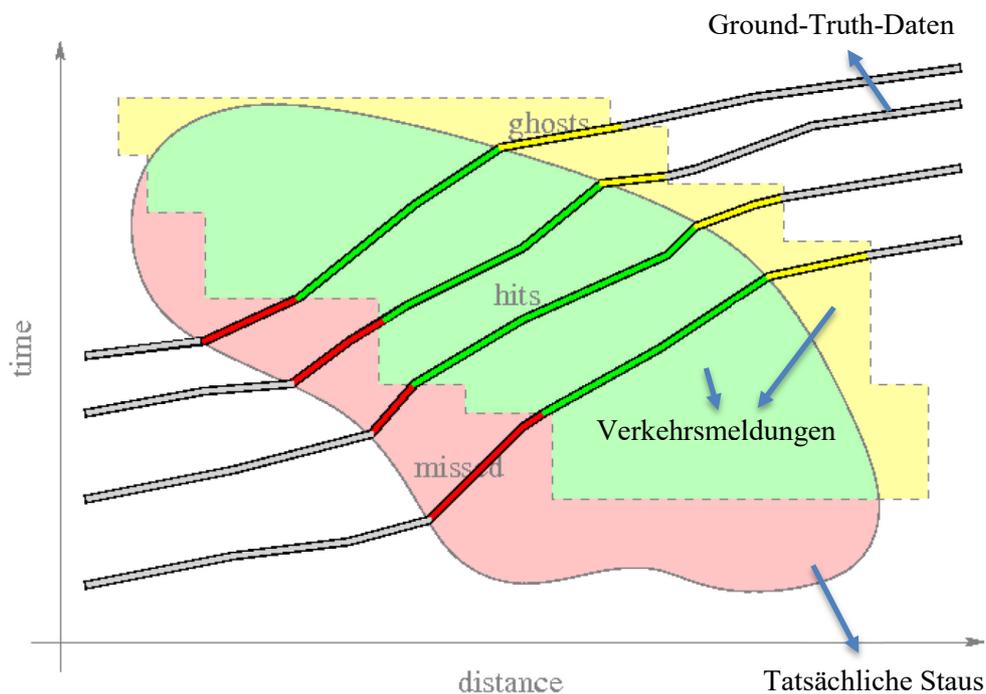


Abbildung 6: Tatsächliche vs. gemeldete Staus (TomTom 2015, S. 6)

Neben dieser grundsätzlichen Einordnung der Strecken spielen Verkehrsbeeinträchtigungen, vornehmlich Staus, eine weitere Rolle für die Routenberechnung. Die genaue Ermittlung von Staus stellt Navigationsdienstleister allerdings vor einige Probleme. In Abbildung 6 sind tatsächliche Staus und erkannte Staus gegenübergestellt. Die Menge der tatsächlichen Staus ist rot eingezeichnet. Wie gut zu sehen ist, deckt

sich die grün markierte Überschneidung nur teilweise mit den gelb eingezeichneten Staumeldungen. Aus diesem Versatz der tatsächlichen Staus zu den Staumeldungen ergeben sich drei Arten von Meldungen. Vergleicht man die Ground-Truth-Daten mit den Echtzeit-Verkehrsdaten ergibt sich bei Übereinstimmung der Staumeldung ein „hit“. Ist ein Stau tatsächlich vorhanden, aber keine Meldung herausgegeben worden, ergibt sich ein „miss“. Ist ein Stau gemeldet worden, aber die Ground-Truth-Daten liefern dafür keine hinreichenden Beweise, liegt ein „ghost“ oder Fehler vor (TomTom 2015, S. 6).

Die Menge der Überschneidungen soll natürlich möglichst groß sein. Der Fusionsprozess und die Reliabilität der Daten entscheiden dabei enorm über die Qualität und die Menge der „hits“.

Steuerung

Die Steuerung bzw. Berechnung der Route erfolgen auf dem Endgerät. Dieses empfängt regelmäßig die aktualisierten Daten und berechnet dann eigenständig auf Basis des Kartenmaterials und der Geschwindigkeitsprofile eine optimale Route.

Dem dafür verwendeten Routing-Algorithmus können vom Nutzer verschiedene Ziele vorgegeben werden. Klassisch sind Ziele wie: Vermeidung von Mautstraßen, Vermeidung von Autobahnen oder schnellste Route. Eine direkte Steuerung der Akteure durch TomTom findet also nicht statt, da TomTom lediglich das Datenmaterial liefert und die Nutzer*innen zudem individuelle Präferenzen eingeben können. Die Routenberechnung selbst ist jedoch eine Black-Box. Er kann einige Parameter einstellen, wie genau diese in die Route eingehen, ist jedoch kaum ersichtlich.

Das liegt vermutlich auch daran, dass Routing-Algorithmen hochkomplexe Probleme lösen müssen. Ohne Echtzeit-Informationen beschränkt sich das zu lösende Problem darauf, den kürzesten Pfad in einem Netzwerk zu finden. Grundlegende Algorithmen für das „shortest-path-problem“ sind immer noch der Bellmann-Ford-Algorithmus (1958) und der Dijkstra-Algorithmus (1959). Obwohl Echtzeit-Daten heute ein großer Faktor für die dynamische „In-vehicle“-Routenplanung sind, basierten 2010 die meisten Systeme auf diesen beiden statischen Algorithmen (Nadi und Delavar 2010, S. 1). Gerade unter Einbeziehung von Echtzeit-Verkehrsinformationen verstärkt sich jedoch die Komplexität des Problems. Ein Wandel der Routing-Algorithmen von statischen, einfach zu implementierenden und weniger rechenaufwändigen zu dynamischen Algorithmen, die zwar mehr Rechenzeit benötigen, aber dafür Echtzeit-Informationen einbeziehen, war unumgänglich (Dong 2011, S. 4).

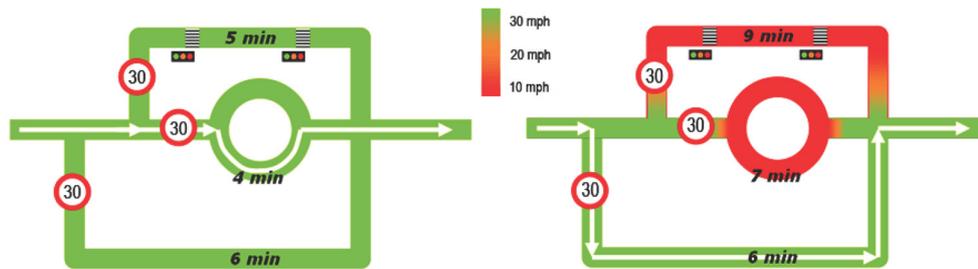


Abbildung 7: Funktionsweise von IQ Routes (TomTom 2018b)

Abbildung 7 zeigt die Funktionsweise von „IQ Routes“, dem Routing System von TomTom. Zusammen mit dem HD Traffic-Service liefert es die Routen mit Echtzeitverkehrsinformation. Offensichtlich handelt es sich um eine dynamische Routenberechnung, denn wie rechts in der Grafik zu sehen ist, wird nicht nur die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit (30 km/h), sondern auch die tatsächlich fahrbare Geschwindigkeit (im rot eingefärbten Bereich nur 10 km/h) mit einberechnet. Zusätzlich werden Faktoren wie Ampeln, Kreisverkehre, starke Steigungen und der Reisetag berücksichtigt (TomTom 2018b).

Verkaufsargument der Navigationsdienstleistung ist nach wie vor die Zeitersparnis. In Zukunft wird dieser Zeitgewinn aber schwierig zu realisieren sein, da zu viele Verkehrsteilnehmer gleichzeitig dieselben Informationen bekommen. Dies führt dann zu einem synchronen Verhalten der Routenumplanung, die lediglich den Stau auf die Ausweichroute verlagert.¹² TomTom ist sich daher bewusst, dass in Zukunft eine intelligentere Steuerung des Verkehrs, die das globale Optimum in den Blick nimmt, an die Stelle der traditionellen Navigation treten muss, die lediglich auf ein lokales Optimum ausgerichtet ist (Experteninterview TomTom 18.06.2018).

TomTom ist also ein Navigationsdienstleister, der mehr tut als lediglich Verkehrsinformationen aufzubereiten, sondern der den Verkehr immer stärker mitsteuert – und damit auch in die Lage geraten könnte, Verantwortung für die emergenten Effekte zu tragen. Denn die Akteure des Straßenverkehrs entscheiden aufgrund der ihnen zur Verfügung gestellten Informationen darüber, welche Route sie wählen. Sie passen ihr Verhalten an und generieren dadurch einen emergenten Systemzustand – wie auch die Daten für den nächsten Zyklus des Big-Data-Prozesses, den der Dienstleister als Feedback benötigt und weiterverarbeitet (Weyer et al. 2018b, S. 75).

3.6 Google Maps

Google wurde 1998 gegründet und ist seit 2015 Teil des Alphabet Konzerns. Seit 2005 bietet das Unternehmen den webbasierten Service Google Maps an – zunächst lediglich als digitale Landkarte. Kurz darauf folgte die Programmierschnittstelle Google Maps Application Programming Interface (API), die es Programmierern erlaubt, den Kartendienst in eigene Anwendungen zu integrieren (Svennerberg 2010, S. 2). Google Maps wurde sukzessive erweitert, zunächst 2007 um einen Routenplaner, der später auch Echtzeitverkehrsinformationen enthielt. Google Live Traffic war in Deutschland seit 2011 verfügbar. Anders als im Fall von HD Traffic, das den

¹² Die BASt schlägt hierzu ein intelligentes Verkehrsbalancing vor.

zentralen Geschäftsbereich von TomTom darstellt, ist Google Maps als ein Teilbereich des Alphabet-Konzerns mit weiteren Diensten dieses Konzerns verknüpft, die zum großen Teil über die APIs auch von anderen Programmen genutzt werden können. Diese Einfachheit der Integration von Google-Diensten in andere Kontexte ist sicherlich mitverantwortlich für dessen häufige Nutzung.

Datengenerierung

Google verfügt über Daten des größten Netzwerks an WiFi-Knoten, deren Nähe zu Smartphones zur Standortbestimmung verwendet werden kann und nutzt zusätzlich GSM-Standortdaten, die von einer großen Zahl von Android-Smartphones erzeugt werden. Diese Datenmengen machen eine GPS-Ortung nach eigenen Angaben überflüssig, diese wird dennoch genutzt (Google 2018a). Für die Routenberechnung stehen Google Maps zudem historische Daten für jede Tageszeit und jeden Wochentag zur Verfügung, die um Echtzeitverkehrsinformationen ergänzt werden (Google 2018b). Auch Straßenzustandsinformationen (wie etwa Geschwindigkeitsbeschränkungen) stehen zur Verfügung (Google 2018c). Ob weitere Daten verwendet werden, wie beispielsweise die von fest installierter Messtechnik (Zählschleifen o.ä.), ist nicht bekannt. Grundsätzlich liegen der Navigation mit Google Maps jedoch dieselben Datenarten zugrunde wie der Navigation mit TomTom, mindestens jedoch: GSM-Standortdaten, GPS-Daten und historische Daten über Streckenauslastungen und mögliche Geschwindigkeiten.

Datenauswertung

Für die Routenberechnung wird die Google Maps Directions API verwendet. Diese kann Reisezeiten anhand der historischen Daten schätzen. Außerdem fließen aktuelle Verkehrsinformationen in die Berechnung ein (Google 2018b). Zusätzlich zum Algorithmus der Routenberechnung werden die Standortdaten ebenfalls mittels eines Algorithmus verfeinert, um die Datenbasis zu verbessern. So werden Genauigkeiten zwischen zehn und zwanzig Metern erreicht (Google 2018a).

Steuerung

Ebenso wie bei der TomTom-Navigation können bei Google Maps verschiedene Nebenbedingungen eingestellt werden. Dazu zählen Verkehrsmittelwahl und die erwünschte oder unerwünschte Nutzung von Mautstraßen, Autobahnen, Fähren und Indoor, also Navigation in Gebäuden. Routen können darüber hinaus anhand bestimmter Parameter, wie Reisezeit, Distanz aber auch Kraftstoffverbrauch, optimiert werden (Google 2018b). Trotz der vielen Möglichkeiten die Route effizient zu gestalten, betreibt auch Google keine direkte Steuerung. Die Akteure entscheiden selbst, ob und wie sie den Vorschlägen des Navigationsservice Folge leisten.

Neben der Anwendung für Routingzwecke verweist Google auf die Möglichkeit des Asset Trackings (Google 2018a). Maschinen können so vor Diebstahl geschützt werden oder Fahrer auf ihrem Weg nachverfolgt werden. Hier zeigt sich eine Form der Steuerung, die nicht direkt vom Navigationsdienstleister ausgeht, bei der es aber möglicherweise einen Zwang oder Druck seitens des Arbeitgebers geben kann, der das Asset Tracking verwendet.

Google Maps als Teil des Alphabet-Konzerns hat im Vergleich zu anderen Navigationsdienstleistern eine größere Vielfalt an Angeboten. Mittels der APIs können Teile von Google Maps auch von anderen Anbietern genutzt werden. Da die Navigationsdienstleistung mit anderen Services (Google Suchergebnisse o.ä.) verbunden ist, eröffnen sich Möglichkeiten, kontrollierend und steuernd in die Prozesse einzugreifen.

Google zielt mit den APIs direkt auf Unternehmenskunden ab, die gesammelte Daten für verschiedenste Zwecke nutzen könnten. Mit Hilfe von Google Roads ist es zum Beispiel möglich, die Routen von Fahrzeugen nachzuverfolgen und Daten über Geschwindigkeiten und Unfallorte zu erheben, die dann wiederum Versicherungen nutzen könnten (Google 2018c). Der Steuerungsaspekt dehnt sich aufgrund der Vielzahl von Daten, über die Google verfügt, auch auf andere Bereiche aus.

3.7 Die öffentliche Hand und andere Akteure

Derzeit dominieren private Anbieter den Markt für Navigationsdienstleistungen im Individualverkehr, beispielsweise TomTom oder Google Maps (vgl. Kap. 3.5 und 3.6). Das Straßennetz ist hingegen im Besitz der öffentlichen Hand und wird von staatlichen Behörden verwaltet. Diese verfolgen Interessen, die von politischen Vorgaben geprägt sind, sich aber auch an den artikulierten Interessen von Bürger*innen orientieren. Für die öffentlichen Straßen wird ein sogenannter Baulastträger bestimmt, die für Planung, Bau, Betrieb und Erhaltung einer öffentlichen Einrichtung zuständige öffentlich rechtliche Körperschaft (BMVI 2014, 7). Für Autobahnen und Bundesstraßen ist dies der Bund, für Gemeindestraßen und Kreisstraßen die jeweilige Stadt und für Landesstraßen das Bundesland. Für verschiedene Abschnitte gelten allerdings Sonderregeln, oder die Baulast wurde auf andere Träger, wie die deutsche Bahn übertragen (BMVI 2014, S. 7).

Datengenerierung

Für die Sammlung von Daten steht von Seiten der öffentlichen Hand zum einen die fest installierte Messtechnik im Vordergrund. Die in Kapitel 3.1 näher erläuterten Techniken, wie Induktionsschleifen oder Kameras, spielen dabei die größte Rolle. Für besondere Problemstellen werden aber auch Expertenwissen, Verkehrsbeobachtungen, Zählungen oder Messfahrten genutzt (Hessen Mobil 2014, S. 29). Verkehrsmeldungen an die zuständigen Leitstellen liefern wichtige Informationen zu akuten Verkehrsbehinderungen. Insgesamt verfügen die Behörden über riesige Datenmengen, die von fest installierter Messtechnik erzeugt werden und durch externe Informationen ergänzt werden. GSM-Standortdaten sind eine dieser externen Datenquellen (Experteninterview BASt 08.08.2018).

Datenauswertung

Für die öffentliche Hand sind neben aktuellen Verkehrslagebildern auch weitere Informationen von Bedeutung, da nicht nur Pkw bzw. der MIV im öffentlichen Interesse beeinflusst werden. Im Gegensatz zu Navigationsdienstleistern wird bei der Auswertungen klar nach Fahrzeugarten unterschieden, sodass die Schwerverkehrsfahrzeuge (Lkw, Busse) oder Radfahrer als Anteil an der Gesamtverkehrsstärke angegeben werden können (Becker und Schnieder 2007, S. 235). Die Genauigkeit

(Veracity) der Daten hat für Behörden daher eine hohe Priorität. Zählschleifendaten werden stark bevorzugt und GSM-Standortdaten, die keinen Aufschluss über die Fahrzeugklassen geben, allenfalls zur Verifizierung verwendet (Experteninterview BAST 08.08.2018). Statistische Auswertungen der technisch erfassten Daten bilden die Basis. Für besondere Engstellen werden neben der statistischen Auswertung der vorhandenen Daten auch Modellrechnungen durchgeführt (Hessen Mobil 2014, S. 29).

Die gesammelten Daten werden über verschiedene Datenmarktplätze (z. B. das Europäische Datenportal) öffentlich zugänglich gemacht. Zum Teil werden weitere Services angeboten, um den Verkehrsteilnehmern die Informationen nutzbringend zur Verfügung zu stellen. Da Verkehrsdichte und -stärke nur schwer interpretierbar sind, wird es den Verkehrsteilnehmern über verschiedene Dienste möglich gemacht Reisezeiten zu ermitteln (Harrer et al. 2018, 33ff).

Steuerung

Im Wesentlichen beschränken sich die Möglichkeiten der aktiven Steuerung des Verkehrs durch Behörden auf die in Kapitel 3.1 genannte Streckenbeeinflussung und Netzbeeinflussung, also zum Beispiel Wechselverkehrszeichen beziehungsweise Zuflussregelungsanlagen. Darüber hinaus sind anreizbasierte Strategien möglich. Deren bekannteste Form ist vermutlich die Maut. In Deutschland wurde die LKW-Maut bereits 2005 eingeführt. Im Zeitverlauf wurde in zwei Runden das betroffene Straßennetz um vierstreifige Bundesstraßen ergänzt und die Mautpflichtgrenze von 12 auf 7,5 Tonnen gesenkt. Im Juli 2018 wurde schließlich das Straßennetz, für das LKW-Maut gezahlt werden muss, um 40.000 km Bundesstraßen ergänzt. Die deutsche LKW-Maut ist außerdem nach Schadstoffausstoß differenziert (BMVI 2018). Das Konzept bietet daher nicht nur einen Anreiz zur Verkehrsvermeidung, sondern auch dazu, die Flotten emissionsarm aufzustellen.

Weitere Maßnahmen sind die Erhöhung der Leistungsfähigkeit (Freigabe von Seitenstreifen), die Anpassung von Parkraum oder das Freischalten von Einsatzrouten (Hessen Mobil 2014, S. 32). Im Gegensatz zu dieser weichen Steuerung (siehe dazu Kap. 4.2 „Governance-Modi“) sind auch harte Steuerungsmaßnahmen denkbar. Dazu zählen vor allem Verbote jeglicher Art. Umweltzonen, die nur von emissionsarmen Fahrzeugen befahren werden dürfen, sind ein klassisches Beispiel. Sperrungen von Straßenabschnitten fallen ebenfalls unter diese harte Steuerung. Im Gegensatz zu TomTom oder Google Maps kann die öffentliche Hand also direkt und unmittelbar steuernd in das Verkehrsgeschehen eingreifen. Für den MIV ist als direkte Steuerungsmaßnahmen außerdem die Umleitung des Verkehrs möglich (Hessen Mobil 2014, S. 32).

Bislang nutzt die öffentliche Hand zur Umsetzung der genannten Varianten von Steuerung weder die durch Navigationsgeräte oder Smartphone-Apps gewonnenen Daten noch deren Funktion als Informations- und Kommunikations-Medium. Verkehrsinformationen sind zwar bereits über Apps abrufbar (Harrer et al. 2018, S. 37), diese Informationsbereitstellung dient allerdings nicht der Steuerung. Insofern sind in jüngster Zeit Tendenzen einer Koordination von staatlichen Behörden und priva-

ten Anbietern erkennbar, die von beiden Seiten ausdrücklich begrüßt werden (Experteninterview TomTom 18.06.2018; Experteninterview BASt 08.08.2018). Ein integriertes System von Informationsaustausch und Verkehrsmanagement zu entwickeln, ist Ziel des Projekts SOCRATES 2.0 (siehe Kap. 3.4). Man will zu einer Win-win-win-Situation für Behörden, private Service-Provider und Verkehrsteilnehmer*innen kommen (Koller-Matschke 2018, 76f). Ob dies gelingen wird, hängt maßgeblich davon ab, ob eine derartige Konstellation einen Nutzen für alle Beteiligten bringt und wie groß die Bereitschaft ist, einen Teil der verfügbaren Steuerungsoptionen mit anderen zu teilen – was im Prinzip auch beinhalten könnte, sich vom jeweils anderen Projektpartner steuern zu lassen.

Die Eingriffsmöglichkeiten von Kommunen in einem solchen koordinierten Steuerungsmodus bestehen im Wesentlichen darin, Durchfahrtsverbote oder Geschwindigkeitsbeschränkungen zu verhängen. Navigationsdienstleister hingegen können bestimmte Routen priorisieren. Bei gelungener Kooperation wäre denkbar, dass Navigationsdienstleister gezielt die Routen empfehlen, deren Kapazität noch nicht ausgelastet ist, was ohnehin ihr Kerngeschäft ist. Dies wäre eine Art Verkehrsbalancing, da der Verkehr auf alle verfügbaren Strecken verteilt würde. Darüber hinaus könnten jedoch Strecken, auf denen die Emissionsgrenzwerte überschritten sind, von den Behörden gemeldet werden und anschließend von den Navigationsdienstleistern in der Priorität herabgestuft werden.



Abbildung 8: Fahrverbote auf Ausweichrouten in Tirol (www.adac.de)

Ein Beispiel sind Fahrverbote Tirols, mit denen an Stau-Wochenenden vermieden werden soll, dass der überregionale Durchgangsverkehr Ausweichrouten durch umliegende Gemeinden nutzt (vgl. Abbildung 8). Wie der ADAC schreibt, kooperieren Behörden und Anbieter, um dieses Ziel zu erreichen:

„Inzwischen wird der Ausweichverkehr auch mit Hilfe der Navigationssysteme unterbunden. Die Fahrverbote habe man an die Betreiber übermittelt, so Tirols

Landeshauptmann Platter. Dadurch würden die gesperrten Straßen nicht mehr als Ausweichrouten angezeigt.“¹³

Der große Vorteil dieser koordinierten Vorgehensweise ist, dass sie die Interessen beider Seiten vereint und dazu beitragen kann, politisch definierte Ziele wie die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten zu erreichen. Inwiefern damit die Interessen aller Beteiligten, also auch der Autofahrerin, die den ökologisch optimierten Umweg fahren muss, befriedigt werden, ist zurzeit eine offene Frage. Auch bleibt zu klären, ob das Vertrauen in die Navigations-Dienstleister nicht sinkt, wenn sie ihren Kund*innen Routen vorschlagen, die nicht das individuelle Optimum darstellen, weil sie gemeinwohlorientierte Elemente enthalten.

Eine transparente Begründung („diese Route wurde gewählt, weil ...“), finanzielle Anreize (z. B. eine geringere Maut) oder Gamification-Elemente (10 Punkte Gutschrift für den Umweg) könnten eventuell dazu beitragen, diesen koordinierten Modus gesellschaftlich konsensfähig zu machen.

3.8 Zwischenfazit

Bereits seit 2002 wurden Echtzeitinformationen, mittels des OLSIM-Systems, zur Verkehrssteuerung in Deutschland genutzt. Seit 2008 kamen mit TomToms HD Traffic auch Endgeräte dazu. Die ersten Smartphone-Apps folgten 2010. Im Jahr 2011 wurde schließlich Google Live Traffic freigeschaltet. Damit hatte sich die Nutzung im MIV weitgehend durchgesetzt. Wie schon angesprochen, setzen Behörden aber nach wie vor auf fest installierte Messtechnik, da diese sehr genaue Daten liefert. Sieht man von weiterführenden Informationen ab, z. B. über die Art der Fahrzeuge oder deren Gewicht, liefern Floating-Phone-Daten aber auch schon heute ähnlich gute Ergebnisse (siehe Kapitel 3.5). Individuelle Wegstrecken können mittels Ortungstechnik bereits deutlich genauer analysiert werden als mit den herkömmlichen Mitteln wie Befragungen und Wegetagebüchern (Schelewsky et al. 2014, 15f). Anhand von Smartphone-Daten konnten außerdem bereits zuverlässig die Transport-Modi Bus, Bahn, Fahrrad, Laufen und Autofahren unterschieden werden (Semanjski et al. 2017). Summiert man die Menge der Personen, die ein Transportmittel an einem Ort nutzen, kann man so leicht Zählungen durchführen. Die zukünftige Entwicklung wird sich daher vermutlich in Richtung digitaler Verkehrszählungen bewegen. Dafür spricht, dass seit 2014 standardisierte Schnittstellen (APIs) in die Verkehrstelematik Einzug gehalten haben. Diese ermöglichen den kollaborativen Einsatz der Technologien in vernetzten Fahrzeugen (TomTom 2018a). Diese Fahrzeuge generieren pro Stunde bis zu 25 Gigabyte an Daten (Richter 2017). Diese riesigen Datenmengen und das Vorantreiben der Vernetzung – sowohl der Technik selbst als auch der beteiligten Akteure – werden den Einfluss von Echtzeit-Daten weiter steigen lassen. Sowohl für den intermodalen Verkehr als auch für den MIV werden vermutlich vielfältige Telematikangebote (weiter-)entwickelt werden.

¹³ www.adac.de/reise-freizeit/reiseplanung/reise-sicherheit/strassensperre (19.02.2020). Allerdings ließ sich dieser Effekt trotz mehrfacher Überprüfung bei unterschiedlichen Anbietern bislang nicht nachvollziehen.

Warum Verkehrssteuerung?

Viele Experten sind sich einig, dass die Wachstumsrate der bestehenden Infrastruktur des Straßenverkehrs gegen Null sinken wird,¹⁴ der motorisierte Individualverkehr sowie der Güterverkehr auf der Straße aber immer weiter zunehmen werden (Experteninterview TomTom 18.06.2018; Experteninterview BAST 08.08.2018; Pfliegl 2011).¹⁵ Staus und erhöhter Emissionsausstoß sind die Folge. Gerade diese Aspekte gilt es aber aus wirtschaftlicher wie ökologischer Perspektive zu berücksichtigen. Eine Verlagerung auf den ÖPV ist zwar immer wieder Thema, die tatsächlich stattfindende gegenteilige Verlagerung konnte aber bisher nicht gestoppt werden, sodass die Nutzung des ÖPV zurückgeht, während der Individualverkehr zunimmt (Schwedes et al. 2016, 5f). Um bestehende Infrastruktur effizienter zu nutzen und damit dem wachsenden Bedarf an Verkehrskapazität gerecht zu werden, ist ein steuernder Eingriff absolut notwendig. Sowohl die öffentliche Hand, die schon jetzt bewusst steuernd eingreift, als auch Navigationsdienstleister, die eher indirekt steuern, sind sich dieser Entwicklung bewusst.

Zukünftiges Verkehrsmanagement

Ein Verkehrsmanagement der Zukunft wird den verstärkten Einfluss von Echtzeit-Daten und die erhöhten Anforderungen an das Governance-Konzept berücksichtigen müssen. Nach Einschätzung von Experten werden variable Verkehrszeichen und Schilder sowie fest installierte Messtechnik uns noch lange begleiten (Experteninterview BAST 08.08.2018). Fahrzeugseitig jedoch wird sich die Entwicklung vermutlich fortsetzen, dass immer mehr digitale Technik und Assistenzsysteme das Fahrzeug zum „intelligent vehicle“ machen (Pfliegl 2011, S. 266). Die anfallenden Daten werden aufgrund steigender Vernetzung vermutlich besser genutzt werden können. Infrastrukturseitig ist nicht mit einem spürbaren Ausbau des Straßennetzes zu rechnen, auch weil dieser vermutlich nicht zielführend wäre. Eine intelligente Straße wie sie Pfliegl schon 2011 vorgeschlagen hat, ist bisher noch nicht flächendeckend realisiert worden (Pfliegl 2011, S. 266), soll aber demnächst in einem Modellversuch in Niedersachsen erprobt werden. An der Vernetzung und dem Datenaustausch der verschiedenen verantwortlichen Institutionen wird allerdings gearbeitet, und der Bedarf an dafür nötiger technischer Infrastruktur soll gedeckt werden (Hessen Mobil 2014, S. 8).

In Bezug auf den Governance-Modus sind verschiedene Szenarien denkbar: Ob es weiter geht wie bisher („business as usual“), unsere Probleme durch radikal neue, "grüne" Technologie gelöst werden oder sich nachhaltige Mobilität durchsetzt, bleibt vorerst abzuwarten (Petersen und Reinert 2018). Relativ sicher ist jedoch, dass Verkehrssteuerung einen Beitrag zur Mobilität von morgen leisten kann. Nach Einschätzung der BAST und von TomTom wird sich die Steuerung des Verkehrs möglicherweise hin zu einem Verkehrsbalancing entwickeln (Koller-Matschke 2018). Auch

¹⁴ Die Länge der Straßen des überörtlichen Verkehrs stieg von 1991 bis 2016 lediglich um 1,59% (vgl. Statistisches Bundesamt (destatis) 2017).

¹⁵ Der Güterverkehr wurde 2016 zu 79% über die Straße abgewickelt – mit steigender Tendenz. Auch der Personenverkehr stieg bis 2015 stetig an, wobei der motorisierte Individualverkehr 80% der Beförderungsleistung ausmachte (vgl. Statistisches Bundesamt (destatis), 595ff).

das bereits gestartete Projekt SOCRATES 2.0 belegt, dass ein koordinierter Governance-Modus ein ernstzunehmendes Szenario für die Zukunft darstellt. Dies wurde in den von uns durchgeführten Experteninterviews mehrfach bestätigt (Experteninterview TomTom 18.06.2018; Experteninterview BASt 08.08.2018). Wenn die Verkehrsströme, basierend auf aktuellen Verkehrslagebildern, stärker gesteuert würden, könnte die bestehende Infrastruktur besser genutzt werden. Bei einer koordinierten Steuerung würden zudem die Ziele sämtlicher Stakeholder – privater wie öffentlicher – angemessen berücksichtigt werden. Ein mögliches Beispiel wäre das Ziel der Einhaltung von Emissions-Grenzwerten, das in der Berechnung der Navigationshinweise integriert werden könnte, um auf diese Weise besonders gefährdete Standorte zu entlasten.

4 Agentenbasierte Modellierung

4.1 ABM als Methode zur Erforschung von Systemdynamiken

Die wissenschaftliche Analyse der Steuerung komplexer soziotechnischer Systeme erfordert den Einsatz neuartiger Methoden, die in der Lage sind, unterschiedliche Szenarien durchzuspielen und auf diese Weise mögliche zukünftige Entwicklungen zu antizipieren. Die klassischen sozialwissenschaftlichen Methoden wie Fallstudien, teilnehmende Beobachtung, Interviews oder fragebogengestützte Einstellungserhebungen sind nur sehr bedingt in der Lage, die Frage zu beantworten, welche gesellschaftlichen Auswirkungen die zunehmende Verbreitung von Echtzeitsystemen haben wird.

Makro-Mikro-Makro-Modelle soziotechnischer Systeme

Die agentenbasierte Modellierung (ABM) hat sich daher in den letzten Jahren als eine Methode entwickelt, die diese Lücke der soziologischen Forschung schließen will. Sie ermöglicht es, Zukunfts-Szenarien experimentell zu erproben und am Computer durchzuspielen – ein entscheidender Vorteil gegenüber bestehenden Methoden. Mithilfe etablierter Verfahren wie der fragebogengestützten Erhebung von Einstellungen kann man beispielsweise versuchen herauszufinden, ob ein Befragter bereit wäre, vom Auto auf das Fahrrad oder den öffentlichen Personennahverkehr umzusteigen. Welche Folgen diese Einzel-Entscheidung hat, vor allem aber wie sich das „handelnde Zusammenwirken“ (Schimank 2010) *vieler Einzelner* auf die Dynamik des gesamten Verkehrssystems auswirkt, kann mithilfe traditioneller Verfahren jedoch nicht ermittelt werden. Auch ist es praktisch unmöglich herauszufinden, wie die Akteure – mit ihren sehr unterschiedlichen Einstellungen – auf externe Anreize reagieren (z. B. den Ausbau des Radwegenetzes) und wie dies sich wiederum auf die Systemdynamik auswirkt.

Die bekannten soziologischen Methoden und Verfahren sind faktisch nicht in der Lage, derartige Prozesse der Aggregation abzubilden, wie sie sich beim Übergang von der Mikroebene der Akteur-Handlungen zur Makro-Ebene der sozialen Strukturen vollziehen (Coleman 1995, S. 14). Statistische Verfahren sowie formale Methoden der Netzwerkanalyse liefern zwar statische Momentaufnahmen großer Kollektive; aber die dynamischen Prozesse der Entstehung und Veränderung soziotechnischer Systeme können sie nicht abbilden – und erst recht nicht erklären.

Und hierin besteht ein weiterer Anspruch von ABM-Konzepten, nicht nur Methode zu sein, sondern einen Beitrag zur soziologischen Theoriebildung zu leisten. Dieser besteht darin, die basalen sozialen Mechanismen herauszufinden, die die Dynamik komplexer soziotechnischer Systeme erklären können; aber diese Mechanismen werden nicht auf der Makro-Ebene der gesellschaftlichen Strukturen, sondern auf der Mikroebene des Handelns von Akteuren bzw. Agenten gesucht (Hedström und Swedberg 1996). Mithilfe von ABM lassen sich erstaunlich komplexe Phänomene (auf der Makro-Ebene) generieren, obwohl die zugrunde liegenden Regeln (auf der Mikroebene) wenig komplex und relativ leicht zu explizieren sind.

In der Modellierung der Agenten, also der Mikroebene, ist die ABM-Community vor zwanzig Jahren mit dem KISS-Prinzip (Keep It Simple, Stupid) gestartet, das in

der Lage war, auf Basis sehr einfacher Agentenregeln komplexe künstliche Gesellschaften entstehen zu lassen (Epstein und Axtell 1996). Die rasant gestiegene Rechnerleistung erlaubt es mittlerweile, auch Agentenmodelle zu implementieren, die auf soziologischen Handlungstheorien basieren und Entscheidungs-Algorithmen enthalten, die der Komplexität des Handelns und Entscheidens realer Entscheider nahekommen (Fink und Weyer 2011).

Beide Ansätze eint jedoch die Vermutung, dass man die soziotechnischen Systeme und deren Dynamik erst verstanden hat, wenn man sie nachbauen kann. „Can you grow it?“ – fragten Epstein und Axtell 1996 in ihrem wegweisenden Buch „Growing Artificial Societies“. Wenn man es schafft, reale Systeme am Computer so nachzubauen, dass das Verhalten künstlicher Systeme dem realer Systeme entspricht, hat man offenbar die Mechanismen verstanden, die Systemdynamik produzieren – so ihr Konzept, das „Bottom-up“ denkt, also von den konkreten Entscheidungen einzelner Akteure ausgeht, anstatt „Top-down“ die System-Funktionen in den Mittelpunkt zu rücken, wie es die Systemtheorie Luhmann'scher Prägung tut (Luhmann 1997).

Die Software NetLogo

Um ein agentenbasiertes Modell eines soziotechnischen Systems technisch zu implementieren, benötigt man eine Software. In den Sozialwissenschaften ist mittlerweile das Programm NetLogo¹⁶ weitverbreitet, unter anderem weil es einen intuitiven Einstieg ermöglicht und sich daher gut für die Lehre eignet. Es erlaubt aber auch die Entwicklung avancierter Programme, die Verfahren der objektorientierten Programmierung nutzen.

Mithilfe von NetLogo kann man biologische, chemische, mathematische, physikalische oder soziale Systeme konstruieren und die Ausbreitung von Waldbränden und Seuchen ebenso simulieren wie die Entwicklung künstlicher Sozialsysteme. Alle Modelle basieren auf der Prämisse, dass sich ein System aus den Interaktionen seiner Komponenten konstituiert und dass die Systemdynamik auf selbstorganisierten Prozessen basiert, die auch ohne Steuerung durch eine zentrale Instanz in Gang kommen. Zudem ließen sich bereits allein im Modus der Selbstorganisation erstaunliche Ergebnisse bzw. Erkenntnisse generieren (Epstein und Axtell 1996; Resnick 1995; Krusch 2008).

Die Computersimulation ermöglicht es, Prozesse, die sich in der Realität über Jahre bzw. Jahrzehnte erstrecken würden, binnen kurzer Zeiträume zu simulieren (van Dam et al. 2013); ferner lassen sich die Parameter kontrolliert variieren, sodass unterschiedliche Szenarien untersucht werden können (z. B. ein Verkehrssystem mit bzw. ohne Förderung der Elektromobilität).¹⁷ ABM-Modelle bestehen in der Regel

¹⁶ Download unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. NetLogo ist kostenlos und enthält bereits eine Vielzahl fertiger Modelle.

¹⁷ Ob die Modelle dabei die Realität korrekt abbilden, mag dahingestellt sein (Resnick 1995, S. 49). Ähnlich wie in den Naturwissenschaften besteht der Anspruch der Computersimulation vor allem darin, die basalen Mechanismen zu beschreiben, mithilfe derer komplexe Phänomene beschrieben werden können (Krause et al. 2009; van Dam et al. 2013). Das Modell

aus drei Komponenten: den Agenten, dem Spielfeld, auf dem sie sich bewegen, sowie den Regeln, denen die Interaktionen der Agenten mit anderen Agenten, aber auch mit den Feldern des Spielfelds folgen (Epstein und Axtell 1996, S. 4; Gilbert 2008).

Modellierung der Agenten

Die softwarebasierten Agenten sind durch interne Zustände wie Alter, Geschlecht etc. sowie durch Strategien charakterisiert, die sie verfolgen (z. B. schnell vorankommen oder die Umwelt schützen). Die Technik der objektorientierten Programmierung ermöglicht es, die Eigenschaften jedes einzelnen Agenten softwaretechnisch zu kapseln, sodass jeder Agent individuelle Eigenschaften hat; zudem können die Entscheidungsprozesse einer großen Zahl von Agenten nahezu simultan abgewickelt werden, sodass große Populationen *heterogener Agenten* am Bildschirm „gezüchtet“ und deren Interaktionsprozesse beobachtet werden können (Epstein und Axtell 1996, S. 14–15; Resnick 1995, 42ff).

Jeder Agent orientiert sich bei seinen Entscheidungen an seinen individuellen Präferenzen und versucht, die aus seiner subjektiven Sicht optimale Lösung zu finden. Die Entscheidungen können also ganz unterschiedlich ausfallen: Der eine fährt Rad, der andere Auto. Die Agenten interagieren mit ihrer Umwelt (dem Spielfeld) sowie anderen Agenten. Sie verändern durch ihre Aktionen die Randbedingungen des Handelns der anderen Agenten, indem sie beispielsweise zur Entstehung eines Verkehrsstaus beitragen.

Modellierung der Systemdynamik

Das Spielfeld, auf dem die Agenten sich bewegen, ist meist als schachbrettartiges Muster aus Zellen (engl. „patches“) konstruiert, die jeweils acht Nachbarzellen haben. Zwischen den Zellen können Informationen fließen (z. B. über den Zustand der Nachbarzellen). Die Agenten bewegen sich über die Zellen und tauschen Informationen mit den Zellen sowie anderen Agenten aus (z. B. „dies ist ein Stück Radweg, das ich momentan belege“). Auf diese Weise ist das System stets in Bewegung.

Durch die Interaktionen der Agenten entstehen emergente Effekte – überraschende und schwer vorhersehbare Systemzustände, die sich nicht aus den Eigenschaften der Systemelemente (also der Agenten) ableiten lassen, sondern das nicht-intendierte Ergebnis der intentionalen Handlungen einer Vielzahl autonom handelnder Agenten sind.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für einen derartigen emergenten Effekt ist der Verkehrsstau. Zwar führt ihn niemand absichtlich herbei, und dennoch entwickelt er sich nur deshalb, weil jeder an seiner Entstehung mitwirkt. Zudem hat er unerwartete emergente Eigenschaften, die in den Regeln auf der nicht aufzufinden sind: Die Autos bewegen sich nämlich vorwärts, der Stau als Makro-Phänomen hin-

muss dabei die Realität nicht hundertprozentig widerspiegeln, sondern soll, folgt man Mitchell Resnick, primär als Quelle der Inspiration dienen, um das Verhalten komplexer Systeme besser zu verstehen.

gegen mit einer konstanten Geschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung – wobei die Teilnehmer wechseln (Resnick 1995, 74, 141; Epstein und Axtell 1996, S. 33–35 sowie das Modell „Traffic basic“ in Netlogo). Im Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses (Kap. 3.2) ist der Effekt gut an der negativen Wellengeschwindigkeit zu sehen.

Das Ganze geschieht dezentral-selbstorganisiert, ohne dass es eines Dirigenten oder eines Steuermannes bedarf, und zwar durch das Wechselspiel von Mikro- und Makro-Ebene: Die Agenten sind in ihren Wahlhandlungen („Choices“) durch die strukturellen Bedingungen („Constraints“) geprägt, die jedoch ihrerseits das Resultat vorheriger (Inter-)Aktionen eben dieser Agenten sind – und sich daher dynamisch wandeln. Die *Dynamik* des soziotechnischen Systems – wie auch dessen Komplexität – ergibt sich daher aus den Interaktionen der Agenten untereinander sowie mit dem Spielfeld.

Dies eröffnet vielfältige Möglichkeiten, mit Interventions-Szenarien zu „spielen“, die beispielsweise verhindern sollen, dass Verkehrsstaus entstehen, also ein globales Optimum anstreben, das mehr ist als die Summe der lokalen Optima sämtlicher Agenten (mit Blick auf Stauvermeidung, CO₂-Ausstoß etc.).

Zwischenfazit: Mikrofundierung und Systemdynamik

Die agentenbasierte Modellierung (ABM) sozialer Systeme hat also drei Eigenschaften, die sie von anderen sozialwissenschaftlichen Methoden unterscheidet:

- Sie ermöglicht eine *Mikrofundierung* sozialer Prozesse, indem sie die Agenten mit Eigenschaften, Präferenzen und Strategien ausstattet, die individuell verschieden sein können. Zudem sind die Interaktionen auf der Mikroebene der entscheidende Motor der Systemdynamik, welcher die Entstehung emergenter Strukturen auf der Makro-Ebene des soziotechnischen Systems *systematisch* erklären kann.
- Sie ermöglicht zudem eine *dynamische Modellierung* soziotechnischer Systeme, die es – wie keine andere Methode – erlaubt, Prozesse der Veränderung und des gesellschaftlichen Wandels zu beobachten und wissenschaftlich zu analysieren, die durch die Wechselwirkung von Mikro- und Makro-Ebene ausgelöst werden.
- ABM ist zudem eine *experimentelle Methode*. Sie erlaubt es also, bestimmte Parameter (wie beispielsweise die Präferenzen der Agenten) gezielt zu variieren und die Auswirkungen dieser Variationen zu beobachten. Computersimulation ist ein Verfahren, um die Gesellschaft ins Labor zu holen, also gezielt Experimente durchzuführen, die im Realmaßstab entweder aus ethischen Gründen verboten wären oder einen viel zu hohen Zeitaufwand erfordern würden (Epstein und Axtell 1996, S. 4).

ABM als Methode zur Erforschung der Echtzeitgesellschaft

Die agentenbasierte Modellierung ist also ein Instrument, das sich für die Untersuchung der Echtzeitgesellschaft sowie der Prozesse der Echtzeitsteuerung eignet. Mit Hilfe von ABM lassen sich Szenarien durchspielen und insbesondere systematische Vergleiche zwischen dem neuen Modus der Echtzeitsteuerung und dem traditionellen Modus der antizipativen Planung durchführen. Zudem lassen sich die Wirkungen

steuernder Eingriffe in komplexe soziotechnische Systeme mit Simulationsexperimenten erforschen, denn sie ermöglichen es, unterschiedliche „Was-wäre-wenn“-Szenarien durchzuspielen.

4.2 Der Simulator SimCo

Konzeption

Der Simulator SimCo („Simulation of the Governance of Complex Systems“) wurde an der TU Dortmund entwickelt, um die Steuerung komplexer soziotechnischer Systeme zu untersuchen, beispielsweise des Verkehrs- oder des Energiesystems. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, ein konkretes System abzubilden. Stattdessen besteht das Simulations-Framework aus abstrakten Knoten und Kanten, die szenario-spezifisch ausgestaltet werden können. Dafür verfügen sie über frei parametrisierbare Dimensionen (vgl. ausführlich Adelt et al. 2018).

Ein Knoten kann beispielsweise eine Kreuzung, ein Parkhaus, ein Bahnhof, eine Ladestation, aber auch ein Supermarkt, ein Kino oder ein Kindergarten sein. Eine Kante ist eine gerichtete Verbindung zwischen zwei Knoten, beispielsweise eine Straße, die von unterschiedlichen Verkehrsmitteln genutzt werden kann, aber auch eine Busspur, ein Fahrradweg oder eine Autobahn, die nur einem spezifischen Verkehrsmittel zur Verfügung steht.

SimCo ist eine agentenbasierte Modellierung und Simulation, was bedeutet, dass die Dynamik und die Komplexität auf Systemebene durch die Interaktion einer Vielzahl heterogener Agenten erzeugt werden, die individuelle und durchaus sehr unterschiedliche Entscheidungen treffen (vgl. Kap. 4.1). Die Logik dieser Entscheidungen lässt sich mithilfe soziologischer Handlungstheorien abbilden, die besagen, dass jeder Agent auf Basis seiner individuellen Präferenzen und Zielvorstellungen und unter Berücksichtigung der Situation, in der er sich befindet, die Handlungsalternativen wählt, mit der er sich subjektiv am besten stellt. Der eine Agent wird also mit dem Auto zur Arbeit fahren, der andere mit dem Fahrrad.

Eine Besonderheit von SimCo besteht darin, dass die Agenten in ihren Entscheidungen von den infrastrukturellen Rahmenbedingungen beeinflusst werden, also zum Beispiel von der Verfügbarkeit von Radwegen (Kanten) bzw. Ladestationen für Elektroautos (Knoten). Die Komponenten der Infrastruktur bilden zugleich die Ansatzpunkte für steuernde Eingriffe, wenn beispielsweise das Fahren mit dem Auto verteuert und die Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel verbilligt wird oder neue Ladestationen errichtet werden.

Das Inventar

In der Endausbaustufe wird der Simulator SimCo aus einer Vielzahl von Modulen bestehen, die sozialen Akteure abbilden. Bislang haben wir bereits die mit einem Stern (*) markierten Module technisch implementiert (siehe Grafik):

- Die Nutzer, die sich durch das Netzwerk bewegen, um ihre Aufgaben zu erledigen, die wir mit einer einfachen Task-Liste, bestehend aus drei Aufgaben (z. B. Kinder zum Kindergarten bringen, zur Arbeit fahren, im Supermarkt einkaufen), abgebildet haben;

- das Netzwerkmanagement, das für einen reibungslosen Betrieb sorgen soll und im Zweifelsfall mit einem Repertoire abgestufter Maßnahmen eingreift;
- Unternehmen, die bestimmte Dienstleistungen anbieten (z. B. Transport mit Bus und Bahn);
- Unternehmen, die die benötigten Technologien herstellen und vertreiben, darunter etablierte Technologien, aber auch innovative Alternativen (zum Beispiel Elektroautos);
- die Politik, die Entscheidungen über die Struktur des Netzwerkes trifft (z. B. Ausbau der Radwege), Grenzwerte setzt (z. B. in Bezug auf Emissionen) und schließlich auch Alternativen fördert (z. B. Elektro-Ladestationen).¹⁸

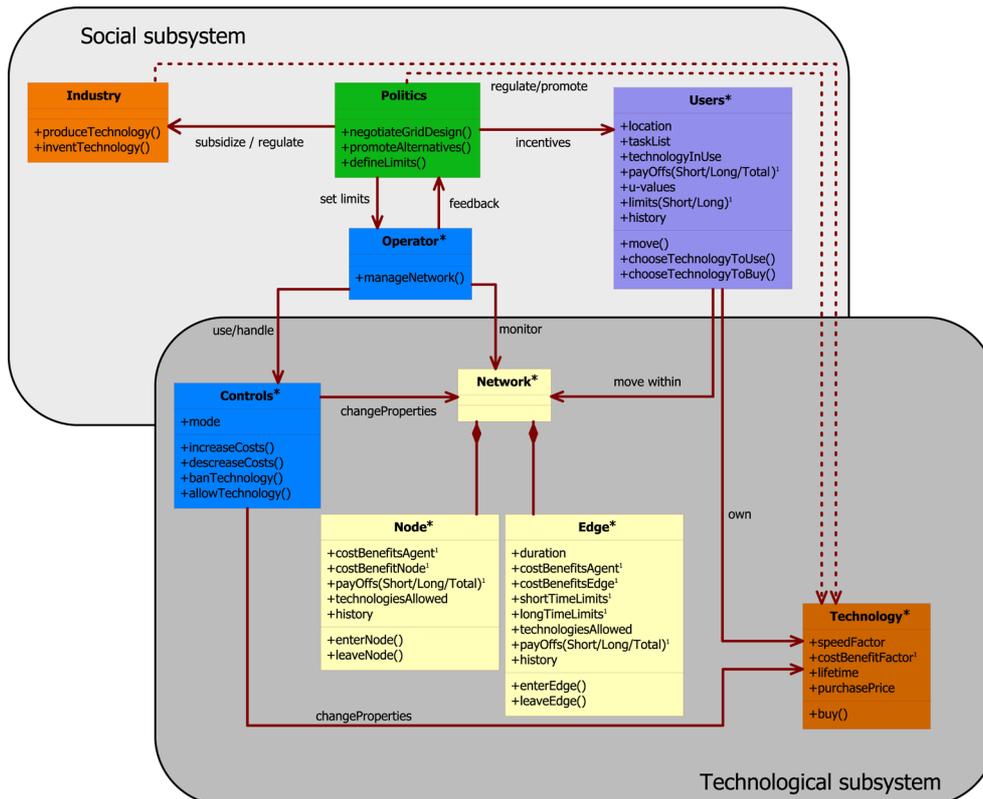


Abbildung 9: Die Subsysteme von SimCo und deren Verknüpfungen (Adelt et al. 2018)

Hinzu kommen noch die technischen Module, nämlich die Knoten, Kanten und Technologien, sowie schließlich die Steuerungsinstrumente.

Interaktionen

Bei jedem Zug verändert jeder Agent den Zustand der Knoten und Kanten des Netzwerkes, und zwar in unterschiedlichen Dimensionen. Bei der Fahrt mit dem Auto zur Arbeit belegt ein Agent beispielsweise ein Stück Straße und stößt zudem Emissionen aus – beides größer als im Fall der Nutzung des Fahrrads. In beiden Fällen können Grenzen erreicht werden, beispielsweise die maximale Kapazität einer Straße, nach deren Erreichung es einen Stau gibt, oder – politisch gesetzte – Grenzwerte für Emissionen, bei deren Erreichung Fahrverbote verhängt werden können.

¹⁸ Diese Entscheidungen werden zurzeit über Szenarien eingespielt, aber nicht agentenbasiert modelliert.

Der Agent verändert zudem seinen eigenen Zustand, weil die Nutzung von Knoten und Kanten Kosten verursacht (Spritkosten, Parkgebühren etc., ggf. Maut), der Besuch von Knoten (Arbeitsstätte) hingegen Einkommen generiert. Und schließlich nutzt er die ihm zur Verfügung stehende Technologie ab – irgendwann muss das Fahrrad ersetzt bzw. eine neue Monatskarte für den öffentlichen Nahverkehr gekauft werden.

Durch die Aktionen und Interaktionen einer Vielzahl von Agenten verändert sich der Zustand des Gesamtsystems permanent. Der nächste Agent, der die betreffende Straße nutzen will, trifft bereits auf eine andere Situation als sein Vorgänger und entscheidet sich möglicherweise anders, nämlich für die Nutzung des Fahrrads, was wiederum Auswirkungen auf die folgenden Entscheidungen anderer Agenten hat usw.

Agentenbasierte Modelle sind also in der Lage, die Entscheidungen einer Vielzahl von Agenten abzubilden und die aus ihnen resultierenden komplexen Systemdynamiken zu beschreiben und zu analysieren.

Interventionen/Steuerung

SimCo enthält eine Vielzahl von „Hebeln“ und „Stellschrauben“, über die in das Geschehen eingegriffen werden kann. Dies kann aus unterschiedlichen Gründen geschehen:

- Risikomanagement: Wenn es das Ziel ist, Risiken zu bewältigen, die zu Fehlfunktionen, zum Stillstand oder gar zum Zusammenbruch des Systems führen können (Verkehrsstau, Blackout im Stromnetz etc.), wird das Netzmanagement versuchen, Abweichungen vom Soll-Zustand durch Gegensteuern (negatives Feedback) zu verhindern, um so die Stabilität des Systems zu gewährleisten (bzw. wiederherzustellen).
- System-Transformation: Wenn es aber das Ziel ist, das System zu verändern, zum Beispiel in Richtung Nachhaltigkeit, werden steuernde Eingriffe darauf abzielen, Abweichungen zu verstärken (zum Beispiel durch Subventionen für Photovoltaikanlagen), um auf diese Weise einen Trend in Gang zu setzen, der letztendlich zum Regimewechsel führen soll (positives Feedback).

Rein instrumentell unterscheiden sich beide Konzepte überraschenderweise wenig, geht es doch im Wesentlichen darum, durch entsprechende Anreize und Eingriffe ein erwünschtes Verhalten auf Agentenebene wahrscheinlicher zu machen und ein unerwünschtes zu verhindern.

Governance-Modi

Steuernde Eingriffe setzen an den Dimensionen von Knoten, Kanten, Technologien oder Agenten an, indem sie beispielsweise die Nutzung einer Technologie auf einer Kante verteuern (Pkw-Maut) oder einen Knoten für eine bestimmte Technologie sperren (Fußgängerzone). Dabei kommen drei unterschiedliche Modi zum Einsatz:

- die Selbstkoordination, in der die Agenten sich untereinander koordinieren und das Netzwerkmanagement das Geschehen lediglich beobachtet (dies ist zugleich unser Basis-Szenario);

- die weiche Steuerung, die mit (negativen oder positiven) Anreizen operiert, die ein bestimmtes Verhalten attraktiv bzw. unattraktiv machen sollen;
- und schließlich die harte Steuerung, die Verbote beinhaltet, beispielsweise ein Verbot der Nutzung bestimmter Technologien auf bestimmten Kanten.

Software-Implementation

SimCo ist in NetLogo programmiert; es hat ein grafisches Nutzer-Interface (vgl. Abb. 10), in dem die Struktur des Netzwerks angezeigt und verschiedene Messwerte ausgegeben werden.

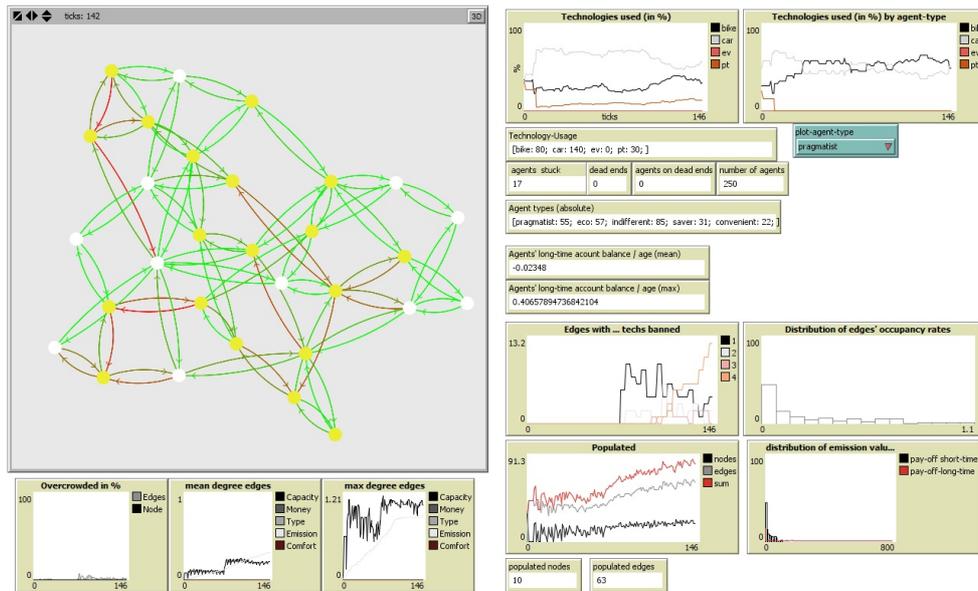


Abbildung 10: Grafische Benutzeroberfläche von SimCo (Adelt et al. 2018)

Das abstrakte Simulationsmodell erlaubt es, unterschiedliche Szenarien zu konfigurieren und zu laden. Wir haben uns für das Szenario eines Verkehrssystems einer mittleren deutschen Großstadt entschieden, dass wir mit Daten der Stadt Dortmund kalibriert haben. Zudem haben wir auf Basis einer Befragung von 506 Personen und deren Präferenzen unterschiedliche Agententypen identifiziert (vgl. Tabelle 1), und zwar:

- den Pragmatiker, der im Wesentlichen schnell ans Ziel kommen will,
- den Umweltbewussten, dem die Umweltauswirkungen des Transports am wichtigsten sind,
- den Indifferenten, der keine klaren Präferenzen hat,
- den „Sparfuchs“, der fast ausschließlich auf den Preis schaut,
- und schließlich den Komfortorientierten, dem neben der Geschwindigkeit vor allem der Komfort wichtig ist.

Akteurtypen	Präferenzen				N	Anteil
	Preiswert	Schnell	Umweltfreundlich	Komfortabel		
Pragmatiker	3,7	6,8	2,4	1,2	119	24 %
Umweltbewusster	4,4	2,0	7,6	1,9	123	24 %
Indifferenter	4,0	4,6	2,8	4,2	157	31 %
Sparfuchs	9,0	4,7	3,7	0,7	58	11 %
Komfortorientierter	0,6	6,4	0,2	6,8	49	10 %
					506	100 %

Tabelle 1: Akteurtypen (Teigelkamp 2015)

Bei der Befragung wurde auch erhoben, wie die Befragten die Wahrscheinlichkeit einschätzen, mit bestimmten Technologien die angestrebten Ziele zu erreichen, also zum Beispiel mithilfe des Fahrrads schnell oder günstig zum Ziel zu kommen. Alle diese Daten sind in ein Szenario eingeflossen, mit dem wir unterschiedliche Experimente durchgeführt haben.

Experimente

Das Basisszenario, in dem die Agenten sich ohne Beeinflussung von außen selbst koordinieren, bietet den Referenzpunkt für Vergleiche mit drei Steuerungsszenarien, deren Motivation eine nachhaltige Transformation des Verkehrssystems war. Wie in Tabelle 2 abzulesen, haben alle drei Varianten von Steuerung erhebliche Auswirkungen, und zwar in puncto Verringerung der Kapazitätsauslastung sowie der Emissionen, aber auch beim Modal share, also den relativen Anteilen von Fahrrädern, Autos und öffentlichem Verkehr.

Szenario	Mittlere Kapazitätsauslastung der Kanten*	Mittlere Emissionen (kurzfristig)*	Mittlere Emissionen (langfristig)*	Nutzung des		
				Fahrrads	Autos	ÖPNV
Selbstkoordination	21,36 %	17,96 %	33,28 %	31,61 %	62,45 %	5,94 %
Weiche Steuerung	15,79 %	12,76 %	24,66 %	46,05 %	37,48 %	16,47 %
Harte Steuerung	19,13 %	15,55 %	28,92 %	41,44 %	52,08 %	6,47 %
Weich/hart (kombiniert)	16,37 %	12,88 %	24,65 %	49,94 %	38,95 %	11,10 %

Tabelle 2: Ergebnisse der Experimente mit SimCo (* in Prozent der jeweiligen Grenzwerte) (Adelt et al. 2018)

Die weiche Steuerung, die mit Anreizen operiert, hat den größten Effekt (ablesbar an den fett gedruckten Zahlen, die jeweils den besten Wert anzeigen). Die harte Steuerung, die über Verbote wirkt, zeigt weniger Auswirkungen, beispielsweise bei der Verlagerung zugunsten des öffentlichen Nahverkehrs. Eine Kombination von harter und weicher Steuerung liefert bei zwei Indikatoren zwar die besten Ergebnisse, die aber nur knapp über denen der weichen Steuerung liegen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass man bereits mit weicher Steuerung eine Menge erreichen kann und nicht zu harten Maßnahmen greifen muss, um mit politisch motivierten Interventionen (hier in Richtung Nachhaltigkeit) die gewünschten Effekte zu erzielen.

Zwischenfazit

Mithilfe der Simulationsexperimente, die wir im Vorfeld dieser Studie mit dem Simulator SimCo durchgeführt haben, kann man Ansatzpunkte für ein Risikomanagement, aber auch für die Transformation komplexer soziotechnischer Systeme identifizieren. SimCo erlaubt es, unterschiedliche Szenarien (mit politisch definierten Zielvorstellungen) durchzuspielen und auf ihre Wirksamkeit sowie mögliche nicht-intendierte Nebenfolgen hin zu testen, bevor steuernde Maßnahmen in der realen Praxis umgesetzt werden.

SimCo eignet sich damit auch für die Untersuchung soziotechnischer Echtzeitsysteme, deren Funktionsweise, Effizienz, aber auch Beherrschbarkeit mit Hilfe von Simulationsexperimenten untersucht werden kann. Auf diese Weise kann ein vertieftes Verständnis der Prozesse der Echtzeitsteuerung entwickelt sowie Einsichten in mögliche Handlungs- und Gestaltungsoptionen generiert werden.

5 Entwicklung der Szenarien

Nach einhelliger Meinung wird es nicht erst in der Zukunft erforderlich sein, stärker steuernd in den Straßenverkehr einzugreifen (Experteninterview TomTom 18.06.2018) und dabei neben bekannten Verfahren wie Wechselverkehrszeichen, Verkehrsmeldungen oder der Einrichtung von Umweltzonen auch neuartige Verfahren einzusetzen. Die Notwendigkeit einer Governance des Verkehrssystems ergibt sich einerseits aus dem Ziel der Optimierung des Verkehrs und der Vermeidung von Staus, andererseits aus dem Ziel der Reduzierung von Emissionen – sowie mittelfristiger einer nachhaltigen Transformation des Verkehrssystems. Dabei gibt es zum Teil Synergieeffekte, da die Stauvermeidung gleichfalls zur Verminderung von Emissionen beiträgt.

Die Erreichung dieser Ziele kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, also durch unterschiedliche Formen von Steuerung bzw. Governance, die wir im Folgenden zu Szenarien verdichten werden.

Dezentrale Selbststeuerung

Eine Option besteht in der Optimierung der dezentralen Steuerung des Straßenverkehrs, dessen Dynamik heutzutage im Wesentlichen auf autonomen Entscheidungen einzelner Verkehrsteilnehmer*innen basiert, die zwar durch Informationen beeinflusst, in ihrer Entscheidungsautonomie jedoch nicht (bzw. kaum) eingeschränkt werden. Die zunehmende Digitalisierung der Fahrzeuge, also ihre Ausstattung mit Fahrerassistenzsystemen aller Art (Abstandsregulierung, Bremsassistent, Rotlichtwarnung bei Kreuzungen) erhöht nicht nur die Sicherheit; die Fahrzeuge entwickeln sich vielmehr in Richtung eines „Intelligent vehicle“, das zunehmend autonom entscheidet und seine Route – unter ökonomischen wie ökologischen Gesichtspunkten – optimiert, dabei aber primär das individuelle Interesse des betreffenden Akteurs in den Mittelpunkt rückt, nicht das globale Optimum bzw. das Gemeinwohl.¹⁹ Eine Steuerung dezentral agierender Akteure wäre zunächst über Signale (Ampeln) und Anreize (Wechselverkehrszeichen) möglich; zudem könnten, wie oben beschrieben, die Fahrzeuge Daten an die Zentrale übermitteln und sie so in die Lage versetzen, ein aktuelles Lagebild zu generieren (Pfliegl 2011, 268f). Es ist allerdings fraglich, ob alleine mittels einer dezentralen Selbststeuerung die verkehrs- und umweltpolitischen Ziele einer Reduktion von Staus und Emissionen erreicht werden können, vor allem wenn die Zahl der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor weiterhin kontinuierlich ansteigt und Alternativen nur in Nischen gedeihen.

Zentrale Steuerung

Die in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren der dynamischen Zielführung mit Hilfe von Navigationsgeräten sind weit verbreitet. Zur Steuerung des Verkehrssystems eignen sich diese Geräte insofern, als individuelle Hinweise gegeben werden können, deren Befolgung auch einen Nutzen für das Gesamtsystem stiftet. Die pessimis-

¹⁹ Man rechnet allerdings nicht damit, dass vollständig autonome Fahrzeuge vor dem Jahr 2039 einen Großteil des Verkehrs ausmachen werden (Ritz 2018, S. 37).

tische Ansicht, dass eine Verlagerung der Entscheidungen auf die Verkehrsteilnehmer kein brauchbarer Ansatz einer nachhaltigen Verkehrspolitik sei, hat sich dank der neuen Anwendungsmöglichkeiten von Smartphones relativiert (Schwedes et al. 2016, S. 45). Mit ihrer Hilfe ist es möglich, Verkehrsinformationen gezielt an die Verkehrsteilnehmer*innen zu verteilen und deren Verhalten mittels Anreizen zu steuern. Auch aus Sicht des Verkehrsmanagements werden Navigationsgeräte, Apps und „In-car“-Technologien mittlerweile verstärkt als geeignetes Instrument der Informationsdistribution angesehen (Koller-Matschke 2018, S. 35). Informationen, die über das Smartphone übertragen werden, treffen bei Akteuren unter Umständen sogar auf mehr Gehör (siehe Kap. 3.4). Wie genau derartige Informationen und Hinweise dazu beitragen, dass reale Personen ihr Verhalten tatsächlich ändern – und z. B. eine andere Route wählen – wurde in der Studie „Vertrauen in mobile Applikationen“ untersucht (Cepera et al. 2019).

Im Folgenden werden mehrere Szenarien entwickelt und mit dem Simulator „SimCo“ untersucht (vgl. Kapitel 4.2), die den Fokus auf die alltägliche Routen- und Verkehrsmittelwahl der Agenten legen, nicht aber auf Fragen der Technologie- oder der Infrastrukturentwicklung. Dabei gehen wir davon aus, dass die Agenten subjektiv rationale Entscheidungen treffen, mit denen sie ihren individuellen Nutzen mehren. Sie werden in den verschiedenen Szenarien auf unterschiedliche Weise mit Routeninformationen versorgt. Neben der bisher bestehenden dezentralen Selbstkoordination, bei der auf jedem Knoten eine Entscheidung getroffen wird, benötigen die Agenten eine Navigationsfunktion. Das Basisszenario wird daher sukzessive um Komponenten dieser Navigationsfunktion erweitert. Dies unterscheidet die hier durchgeführten Experimente von den bisher mit SimCo durchgeführten Versuchsreihen.

5.1 Basisszenario

Im Basisszenario bewegen die Agenten sich durch das Verkehrsnetz und treffen dabei individuell rationale Entscheidungen. Dabei sind sie mit einer Sichtweite von 1 ausgestattet, d. h. sie können lediglich auf Informationen über den Zustand der Knoten (und den zu diesen führenden Kanten) zurückgreifen, die mit dem Knoten, auf dem sie sich befinden, direkt verbunden sind. Sie haben also keinerlei Informationen über den Zustand des Gesamtsystems, sondern operieren im Modus der lokalen Optimierung.

Dieses Szenario wurde bereits eingehend getestet, kalibriert und ausgewertet (Adelt und Hoffmann 2017; Adelt et al. 2018; Weyer et al. 2018a) und steht als erprobtes Basisszenario zur Verfügung, mit dessen Hilfe wir die Referenzwerte generieren, die wir für den Vergleich mit anderen Szenarien, vor allem mit unterschiedlichen Steuerungsszenarien benötigen.

5.2 Basisszenario mit starrer Routenplanung

In diesem Szenario haben die Agenten eine erweiterte Sicht auf das System, die in etwa dem entspricht, was man auf einer Straßenkarte sehen kann – nämlich einen vollständigen Überblick über das Straßennetz, allerdings ohne aktuelle Zustandsinformationen. Ganz im Stil traditioneller Routenplanung berechnet der Simulator im Voraus für jeden Agenten die kürzeste Route vom Start- zum Zielknoten (allerdings

nur, falls dieser sich für das Verkehrsmittel „Auto“ entschieden hat). Die Agenten werden dieser Route stur folgen und weder Alternativ-Routen noch den Wechsel des Verkehrsmittels in Betracht ziehen. Auf diese Weise bilden wir die traditionelle Form der strategischen Routenplanung ohne Echtzeit-Informationen ab.

Implementation

SimCo wurde um eine einfache Routenberechnung erweitert, die 80 Prozent der Agenten verwenden, welche sich für das Auto als Verkehrsmittel entscheiden.²⁰ Ferner wird davon ausgegangen, dass die Agenten, die die Funktion nutzen, dieser blind vertrauen.²¹ Die Route vom Start- zum Zielknoten wird mittels des Shortest-path-Algorithmus errechnet, was wir technisch mit der Netzwerk-Erweiterung (nw-Extension) von NetLogo realisiert haben (Wilensky 1999). Diese lässt eine Berechnung des kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten in einem Netzwerk unter Berücksichtigung von Kantengewichten zu. Im Szenario mit starrer Routenplanung wird die kürzeste Route nur einmal (nämlich vor Beginn der Fahrt) berechnet, wobei als Gewicht lediglich die Länge der Straße, gemessen in Fahrzeit ohne Verkehr, eingeht.

5.3 Intelligente Navigation mit Echtzeitinformationen

In diesem Szenario verfügen die Agenten über eine Navigations-Funktion, die ihnen aktuelle Daten in Echtzeit zur Verfügung stellt und ihnen einen erweiterten Überblick über das Gesamtsystem gibt. Sie können nunmehr ihre Route dynamisch verändern und an die aktuelle Verkehrssituation anpassen.

Implementation

In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass für das rationale Kalkül der Agenten die Reisedauer alternativer Routen besonders interessant ist, die von eventuellen Tempolimits, vor allem aber von der Kapazitätsauslastung beeinflusst wird. Dem Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses folgend (siehe Kapitel 3.2), wird die Auslastung und die daraus resultierende Verlangsamung des Verkehrsflusses in diesem Szenario als zusätzliches Kantengewicht in die Routenberechnung integriert. Dies wird in Abschnitten durch drei lineare Funktionen modelliert.

Bei einer Auslastung der Kante von bis zu 30% herrscht unserer Annahme nach Free-Flow. Die Geschwindigkeit auf der Kante ist so hoch, dass die Dauer der Fahrt nicht beeinflusst wird. Ab einer Auslastung von über 30% bis zu einer Auslastung von 90% sinkt die mögliche Geschwindigkeit kontinuierlich. Abgebildet wird dies, indem die Dauer der Fahrt auf der Kante mit einem Faktor multipliziert wird. Dieser Faktor steigt linear von 1 bis 3. Ab einer Auslastung von 90% steigt dieser Faktor nicht mehr. Unter dem Kantengewicht sollen verschiedene etwaige Verkehrsbehinderungen (Stau durch zu hohe Auslastung, Unfälle, Wetter) zusammengefasst werden und vereinfacht in die Simulation eingehen.

²⁰ Ca. 77% der Autofahrer in Deutschland nutzen einen Dienst für Routeninformationen (siehe dazu Kap. 3.1).

²¹ Diese vereinfachende Annahme kann mit Ergebnissen der Studie „Vertrauen in mobile Applikationen“ um realistische Annahmen, bezüglich der Befolgung von Handlungsempfehlungen durch Apps, erweitert werden (Cepera et al. 2019).

Die Fahrtzeit auf einer Strecke liegt im Modell also je nach Kapazitätsauslastung zwischen der ursprünglichen und dem dreifachen der ursprünglichen Fahrtzeit. Die Agenten verfügen über eine dynamische Navigation, die sich an die aktuelle Verkehrslage anpasst, da sie während der Fahrt zu ihrem Zielknoten die Route ändern können.

5.4 Koordinierter Modus

Der koordinierte Modus stellt insofern eine Erweiterung der intelligenten Navigation dar, als nunmehr politisch konsentrierte Ziele zusätzlich in das Szenario eingespielt werden, und zwar in unserem Fall die (lokale) Senkung der verkehrsbedingten Emissionen. Die Ziele der Agenten und der Navigationsdienstleister bleiben unverändert, nämlich Routen zu finden, die eine Zeitersparnis bedeuten.

SimCo ermöglicht es, weich (über Anreize) oder hart (über Verbote) bzw. durch eine Kombination von harter und weicher Steuerung zu intervenieren und die Effekte derartiger Eingriffe zu analysieren (vgl. Kap. 4.2). Der koordinierte Modus der Verkehrssteuerung basiert im Wesentlichen auf Mechanismen der weichen Anreiz-Steuerung, die über die intelligente Navigationsfunktion umgesetzt werden. Diese schlägt den Agenten nunmehr Routen vor, die einen Kompromiss unterschiedlicher Ziele beinhalten. Eine harte Steuerung durch Verbote haben wir – trotz aktueller Debatten über Dieselfahrverbote – nicht untersucht.

Implementation

Der koordinierte Modus wurde implementiert, indem der Navigationsfunktion ein weiteres Kantengewicht für die Routenberechnung hinzugefügt wurde, das von einer externen politischen Instanz anhand der Emissionen festgesetzt wird, die auf der jeweiligen Kante gemessen werden. Der Ausgangswert beträgt 1, beeinflusst also die Entscheidungen der Agenten nicht. Die politische Instanz haben wir nicht im Detail modelliert, sondern spielen sie – vor dem Hintergrund aktueller umweltpolitischer Debatten – als externen Faktor in die Simulationen ein.

Steigen die Emissionen auf einer Kante auf ein bestimmtes Maß, nämlich 60 Prozent des Limits an, wird dieses zusätzliche Kantengewicht mit dem Faktor 1,1 erhöht. Bleiben die Emissionen unverändert hoch, wird das Gewicht weiter erhöht, bis es den Maximalwert von 3 erreicht. Sinken die Emissionen, wird das Kantengewicht in gleicher Weise wieder gesenkt. Zu jedem Zeitpunkt („Tick“) der Simulation kann der Steuerer das Kantengewicht anpassen und so eine Strecke unattraktiver bzw. attraktiver machen. Die Anpassung geschieht also in Echtzeit. Die Emissionswerte, auf denen die Entscheidung basiert, werden jedoch über einen Zeitraum von 144 „Ticks“ akkumuliert, was einer Zeitspanne von einem (fiktiven) Tag entspricht. Der Steuerer bezieht sich bei seiner Anpassung des Kantengewichts auf die Emission des jeweiligen Tages und senkt gegebenenfalls die Attraktivität einer hoch belasteten Kante.

Ein Ziel unserer Modellierung ist herauszufinden, wie stark sich die Agenten durch umweltpolitisch motivierte Eingriffe beeinflussen lassen bzw. – umgekehrt – wie hoch die Intensität der Eingriffe sein muss, damit sie Wirkungen zeigen. Dies ist

auch deshalb relevant, weil zusätzlich andere Kriterien (z. B. die Zeitersparnis, der Komfort etc.) in das rationale Kalkül der Agenten einfließen.

Wir haben daher in unseren Experimenten das zusätzliche (politisch motivierte) Kantengewicht nicht zu 100 Prozent in die Berechnung einfließen lassen, sondern dessen Eingriffstiefe schrittweise von 10 bis 50 Prozent variiert. Bei der höchsten Eingriffstiefe werden die Ziele also gleich gewichtet. Neben der Kapazitätsauslastung einer Strecke beeinflussen in diesem Szenario also auch die Emissionswerte die Attraktivität einer Strecke und somit die Routenberechnung der intelligenten Navigation.

6 Experimente

6.1 Setup

Als Plattform für alle Szenarien verwenden wir ein Straßennetzwerk aus 600 Knoten, die über 2.622 Kanten verbunden sind, also das erprobte und empirisch validierte Basisszenario von SimCo, das in NetLogo implementiert wurde (Adelt et al. 2018). Jeder Simulationsdurchlauf dauert 8.000 Ticks, die Zeiteinheit des Programms NetLogo. 144 Zeiteinheiten entsprechen dabei einem Tag. Ein Durchlauf bildet demnach einen Zeitraum von ca. zwei Monaten ab.

Knoten

Das Netzwerk, das den folgenden Szenarien zugrunde liegt, besteht aus den in Kapitel 4.2 näher erläuterten Knoten und Kanten. Die Knoten sind nochmals unterteilt in Home-Knoten und Task-Knoten. Die Home-Knoten stehen beispielhaft für die Start- und Endpunkte oder das Zuhause der Agenten. Auf diesen können die Agenten ihre Technologie wechseln. Sie kommen dort beispielsweise mit dem Fahrrad an und fahren mit dem Auto weiter. Die Task-Knoten hingegen dienen den Agenten dazu Aufgaben abzuarbeiten. Wenn die Agenten einen Task-Knoten erreichen, arbeiten sie dort oder erledigen sonstige Aufgaben. Haben sie drei „Tasks“ erfüllt, verdienen sie dadurch Geld. Dies benötigen sie beispielsweise für die Bezahlung von Transport- oder Maut-Kosten. Das Geld wird ihrem Konto gutgeschrieben, wenn sie nach Erledigung von drei Aufgaben (Tasks) wieder auf einem Home-Knoten landen.²²

Agenten

In diesem Netzwerk bewegen sich zunächst 6.000 Agenten, die unterschiedlichen Agententypen zugeordnet werden, und zwar 1.000 Pragmatiker, 600 Umweltbewusste, 1.800 Indifferente, 600 Sparfüchse und 2.000 Komfortorientierte. Sie unterscheiden sich anhand ihrer Präferenzen (siehe Tabelle 1 in Kap. 4.2).²³ Die Agenten starten ihre Reise auf ihrem Home-Knoten und entscheiden sich hier für ein Verkehrsmittel (Auto, Rad, Bus und Bahn), das sie während der Reise nicht wechseln dürfen.²⁴ Dann wählen sie eine Route zu einem benachbarten Knoten, der entweder bereits ihr Ziel ist oder auf dem Weg zu ihrem Ziel liegt. Bei der Routenwahl greifen sie – je nach Szenario – auf statische bzw. dynamische Planungs-Tools zurück. Bei einer geplanten Route sind der Start- und der End-Knoten immer Home-Knoten, da sie dort ihr Verkehrsmittel wechseln und eine neue Route beginnen können. Während ihrer Reise erreichen die Agenten auch Task-Knoten und arbeiten Aufgaben ab, um Geld zu verdienen. Je nach Länge ihrer Route werden nicht immer drei Task-Knoten erreicht, sodass sie erst bei der nächsten Route alle Aufgaben erledigen können.

²² Um das Programm nicht zu überlasten, haben wir uns dafür entschieden, dass dies ein beliebiger Knoten vom Typus „Home“ sein kann.

²³ Die Präferenzen stimmen mit der Tabelle überein. Die Anteile der Agententypen wurden aber anhand neuerer Daten bestimmt. Das Modell wurde dafür mittels Daten einer Haushaltsbefragung der Stadt Dortmund kalibriert (siehe dazu Meißner 2014; Adelt et al. 2018).

²⁴ Intermodaler Verkehr ist in diesem Szenario also (vorerst) nicht vorgesehen.

Verkehrssteuerung

Um gezielt Situationen der Überlastung des Verkehrsnetzes zu provozieren, haben wir die Zahl der Agenten in 1.000er-Schritten bis auf 12.000 erhöht. Jedes Experiment wurde also siebenmal mit einer fixen Anzahl von 6.000 bis 12.000 Agenten wiederholt. Auf diese Weise konnten wir die Belastbarkeit bzw. die Netzeffizienz unter verschiedenen Bedingungen und verschiedener Auslastung untersuchen und zudem die Wirksamkeit von Maßnahmen der Verkehrssteuerung testen.

Neben dieser Makro-Sicht auf das gesamte Verkehrssystem haben wir auch die Mikro-Perspektive in den Blick genommen, indem wir untersucht haben, ob und in welchem Maße es den einzelnen Agenten gelingt, ihre individuellen Ziele zu erreichen.

Makro-Indikatoren

Es wurden vier Makro-Indikatoren zur Vermessung des Zustands des Verkehrssystems verwendet:

- Die *kurzfristige Emission* auf den Kanten, wobei kurzfristig sich auf den fiktiven Tag im Modell (144 Ticks) bezieht. Dieser Wert gibt an, wieviel im Mittel auf allen Kanten des Modells emittiert wurde, dargestellt als Anteil am Emissionslimit. Dieses Limit ist allerdings keine natürliche Größe, wie etwa 100 Gramm CO₂, sondern ein artifizielles Limit, das lediglich dazu dienen soll, die gemessenen Werte zu vergleichen. Ein politisch motiviertes Ziel, dessen Berechtigung wir hier nicht diskutieren können, ist die Reduktion umweltschädlicher Emissionen, z. B. durch Verlagerung auf andere Verkehrsträger.
 - Es wurde auch die gewichtete Summe der Emissionen (auf Knoten und Kanten) gemessen. Diese liefert besser vergleichbare Werte, wenn viele Agenten auf den Knoten feststecken (siehe unten).
 - Außerdem wurde die Emission auf der maximal belasteten Kante gemessen (siehe Kapitel 6.4). Sinkt dieser Wert, werden Emissionsspitzen vermieden.
- Die *kurzfristige Auslastung* der Kanten. Dieser Wert zeigt, wie stark die Kanten befahren waren. Auch hier ist der Wert zu lesen als Anteil am Limit, also der maximalen Kapazität. Ein politisch motiviertes Ziel, dessen Berechtigung wir hier ebenfalls nicht diskutieren können, ist die Verringerung von Staus und die bessere Auslastung des Verkehrssystems, z. B. durch eine intelligentere Nutzung des Netzes oder durch eine Verlagerung auf andere Verkehrsträger. Dies gilt in ähnlicher Weise für die beiden nächsten Punkte.
 - Anhand der Auslastung ergibt sich das Kantengewicht für die Routenberechnung der intelligenten Navigation, welches ebenfalls gemessen wurde.
 - Gemessen wurde zudem die durchschnittliche Anzahl der überlasteten Kanten. Dieser Wert ist ein gutes Maß für die Netzeffizienz.
- Die durchschnittliche Anzahl der *im Stau stehenden Agenten*. Auch dieser Wert zeigt an, wie effizient das Netz operiert. Simulationsbedingt stecken Agenten auf den Knoten fest, wenn die Kante, die sie befahren wollen, bereits ausgelastet ist.
- Der *Modal Split*. Dieser Wert steht für die Verteilung der Agenten auf die Verkehrsträger Pkw, Fahrrad und öffentlicher Verkehr. Ein politisch motiviertes

Ziel ist der „modal shift“, also der Umstieg vom motorisierten auf den nichtmotorisierten Individualverkehr oder auf den öffentlichen Verkehr.

Mikro-Indikatoren

Ferner wurden die drei folgenden Mikro-Indikatoren zur Vermessung des Grades der Technologiewahl und Zielerreichung der Agenten verwendet:

- Der *Modal Split* der Agententypen. Die verschiedenen Agententypen weisen unterschiedliches Nutzungsverhalten auf und reagieren anders auf Veränderungen.
- Die *SEU-Werte*. Diese Werte drücken aus, wie stark die gewählten Handlungen (Verkehrsmittel und Routenwahl) die Präferenzen der Agenten erfüllen.
- Die *korrekt befahrenen Knoten*. Der Wert zeigt die individuelle Zielerreichung anhand der richtig erreichten Task-Knoten.

Iterationen

Jedes der folgenden Experimente wurde mit zehn verschiedenen Saatwerten durchgeführt.²⁵ Die Auswertungen basieren auf den Mittelwerten von jeweils zehn Durchläufen, womit Verzerrungen durch Ausreißer verhindert werden. Das Basisszenario mit 6.000 Agenten bildet dabei den Referenzwert, auf den sich alle weiteren Experimente beziehen, bei denen die Agentenzahlen in 1.000er-Schritten erhöht werden. Jedes Experiment des Basisszenarios, der starren Routenplanung, sowie der intelligenten Navigation wurde also 70 mal durchgeführt: mit sieben verschiedenen Agentenpopulationen und mit zehn verschiedenen Saatwerten.

Für das Governance-Szenario des koordinierten Modus wurde zusätzlich die Eingriffstiefe zwischen 10 und 50 Prozent in 10-Prozent Schritten variiert. Daraus ergeben sich 350 Iterationen: für die sieben verschiedenen Agentenpopulationen mit zehn verschiedenen Saatwerten und fünf verschiedenen Eingriffstiefen.

6.2 Basisszenario

Netzeffizienz (Makroebene)

Tabelle 3 zeigt die simulierten Ergebnisse des Basisszenarios für Populationen von 6.000 und 12.000 Agenten.²⁶ Es handelt sich um die Mittelwerte aller Iterationen des jeweiligen Szenarios und der jeweiligen Agentenzahl. Mit der Erhöhung der Agentenzahl kann die Robustheit des Systems gegenüber einer Überlastung durch eine höhere oder zu hohe Population getestet werden. Die Indikatoren des Emissionsausstoßes und der Netzeffizienz für den Governance-Modus der dezentralen

²⁵ Der Saatwert bestimmt die Generierung von Zufallszahlen, sodass ein Experiment mit demselben Saatwert immer dieselben Ergebnisse liefert.

²⁶ Dargestellt sind im Folgenden nur die Ergebnisse für 6.000 und 12.000 Agenten und eine Eingriffstiefe von 50 Prozent. Die ausgelassenen Werte für 7.000 bis 11.000 Agenten und 10 bis 40 Prozent Eingriffstiefe (koord. Modus) weisen einen nahezu linearen Anstieg mit der Agentenzahl und Eingriffstiefe auf. Sie zeichnen im Wesentlichen die Trends der Indikatoren nach, die sich bereits aus dem Vergleich der niedrigsten und höchsten Agentenzahlen ergeben, weshalb eine detaillierte Erläuterung keinen Mehrwert bietet.

Selbststeuerung (Basisszenario) werden als Vergleichswert für die folgenden Governance-Szenarien dienen.

Szenario und Anzahl Agenten		Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten (gesamt)	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Pkw	Fahrrad	ÖPNV
Basis-szenario	6000	10,1%	8,2%	22,8%	3,0%	0,0%	60,5%	32,1%	7,4%
	12000	13,1%	15,2%	43,0%	12,5%	22,2%	51,2%	35,5%	13,4%

Tabelle 3: Emissionen, Auslastung und Modal Split für das Basisszenario

Im Basisszenario liegen die Emissionen auf den Kanten zunächst bei 10,1 und die Emissionen auf Kanten und Knoten bei 8,2 Prozent des Limits²⁷. Wird das Verkehrsnetz mit zusätzlichen Agenten belastet, sodass sich 12.000 Agenten darin befinden, steigen die Werte auf 13,1 bzw. 15,2 Prozent. Die Emissionen auf Knoten und Kanten²⁸ liegen also zunächst unter den Emissionen, die auf den Kanten gemessen wurden, steigen aber mit der Agentenzahl stärker an. Dieser Effekt wird durch die im Stau stehenden Agenten verursacht, die – simulationsbedingt – ihre Emissionen auf den Knoten verursachen (siehe Kapitel 6.1). Bei einer hohen Agentenzahl steht ein höherer Anteil der Agenten (22,2 Prozent) im Stau. Es wird daher mehr auf den Knoten emittiert, und der Gesamtwert für Emissionen auf Kanten und Knoten steigt an.

Die Netzeffizienz des simulierten Verkehrssystems lässt sich anhand der Auslastung, Überlastung der Kanten und der Agenten im Stau erkennen. Die Auslastung der Kanten steigt mit der Agentenzahl von 22,8 auf 43,0 Prozent an. Gleichzeitig steigt der Anteil der überlasteten Kanten von 3,0 auf 12,5 Prozent an, und es stehen 22,2 Prozent der Agenten im Stau, falls das System mit mehr Agenten belastet wird.

Der Modal Split, die Verteilung auf verschiedene Verkehrsträger und somit ein weiterer Indikator für den Zustand des Verkehrssystems auf der Makroebene, zeigt eine Nutzung des Pkw von 60,5 Prozent. Das Fahrrad wird mit 32,1 Prozent deutlich weniger häufig, und der ÖPNV wird mit 7,4 Prozent am wenigsten genutzt. Mit steigender Agentenzahl verschiebt sich der Modal Split vom Pkw in Richtung Fahrrad und ÖPNV, wobei die Nutzung des ÖPNV mit 6,0 Prozentpunkten stärker steigt als die des Fahrrads mit 3,4 Prozentpunkten. Der um 9,3 Prozentpunkte kleinere Anteil der Autofahrer bei hoher Agentenzahl lässt sich dadurch erklären, dass Autofahren aufgrund der Überlastung des Systems unattraktiver wird. Die absolute Zahl der Autofahrer ist also größer, aber die durch sie verursachte Überlastung führt dazu, dass Autofahren im Gesamtsystem weniger attraktiv wird.

²⁷ Siehe Erläuterung der Indikatoren in Kapitel 6.1.

²⁸ Gewichtetes Mittel anhand der Anzahl der Kanten und Knoten. Aufgrund der Berechnung des gewichteten Mittels für Knoten und Kanten kann der Wert kleiner sein als der Emissionswert für die Kanten.

Zielerreichung (Mikroebene)

Abbildung 11 zeigt prozentuale Pkw-Nutzung der verschiedenen Agententypen für die Simulationsläufe mit niedriger und hoher Populationsgröße.

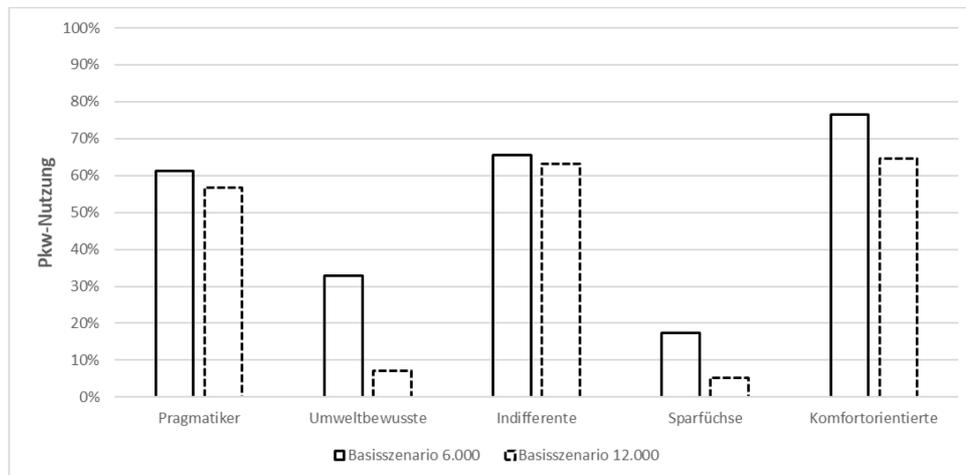


Abbildung 11: Pkw-Nutzung nach Agententypen im Basisszenario

Für das Basisszenario lag der Anteil des Pkw bei 60 Prozent und sank mit der Agentenzahl auf 51 Prozent (siehe auch Tabelle 3). Die pragmatischen Agenten liegen mit 61 Prozent Pkw-Nutzung sehr nah an diesem Wert, der Anteil des Pkw nimmt jedoch mit der Agentenzahl nicht so stark ab und sinkt nur auf ca. 57 Prozent. Indifferente und komfortorientierte Agenten nutzen den Pkw etwas häufiger. Im Gegensatz dazu wird das Auto von umweltbewussten Agenten und Sparfüchsen deutlich seltener genutzt. Hier sinkt der Anteil außerdem stärker, wenn die Population erhöht wird, und liegt für beide Typen unter 10 Prozent. Insgesamt reagieren die Pragmatiker und indifferenten Agenten also nicht mit einem Technologiewechsel auf den Anstieg der Population, sondern fahren weiterhin mit dem Pkw. Umweltbewusste Agenten, Sparfüchse und komfortorientierte Agenten reagieren allerdings, indem sie auf andere Verkehrsmittel umsteigen. Dieser Effekt ist also je nach Typ unterschiedlich stark ausgeprägt.

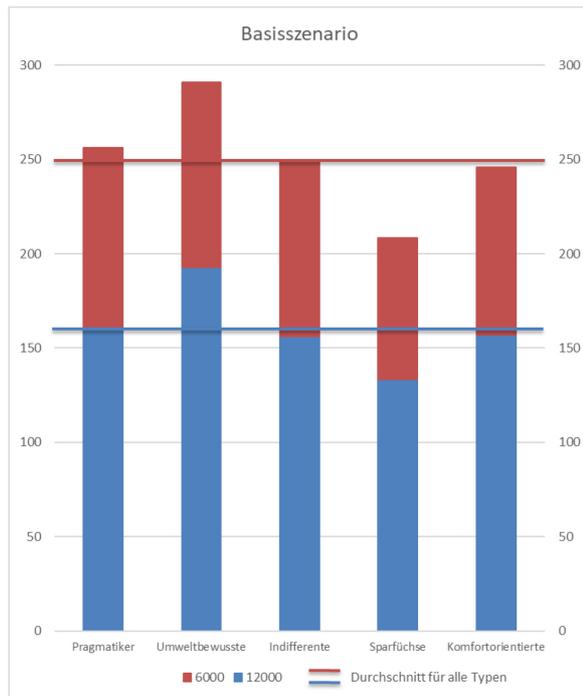


Abbildung 12: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agententypen im Basisszenario

In Abbildung 12 sind die erreichten Task-Knoten der verschiedenen Agententypen dargestellt, die Aufschluss über den Erfolg der Zielerreichung auf der Mikroebene des Systems geben.²⁹ Korrekt bedeutet hier, dass die Agenten einen Task-Knoten genau dann erreichen, wenn auf ihrer „ToDo-Liste“ (siehe Kapitel 6.1) als nächstes Ziel ein Task-Knoten – und nicht etwa ein Home-Knoten – steht. Der Durchschnitt über alle Agententypen, sichtbar anhand der durchgezogenen Linien, verringert sich mit steigender Agentenzahl von ca. 250 (rot, 6.000 Agenten) auf ca. 160 (blau, 12.000 Agenten) erreichte Knoten.³⁰

Konsistent mit den Ergebnissen zur Netzeffizienz auf der Makroebene verringert sich die Zielerreichung der Agenten, wenn das System überlastet wird. Die verschiedenen Agententypen sind aber unterschiedlich stark von der Überlastung betroffen. Für die pragmatischen Agenten liegen die Werte, wie auch schon beim Modal Share, sehr nah an denen des Gesamtsystems. Auch indifferente und komfortorientierte Agenten zeigen nur geringe Abweichungen. Umweltbewusste Agenten erreichen mehr, Sparfüchse hingegen weniger Knoten als die anderen Agententypen. Diese Unterschiede sind auf die unterschiedliche Nutzung der Verkehrsträger zurückzu-

²⁹ Es handelt sich um hintereinander gelegte Balken. Der Abstand (rote Fläche), zeigt also den Unterschied zwischen 6.000 und 12.000 Agenten im Modell.

³⁰ Die Werte für die Home-Knoten, die hier nicht abgebildet sind, liegen bei ca. einem Drittel der Werte für die Task-Knoten, was angesichts der Reihenfolge „Home-Task-Task-Task“ plausibel erscheint

führen. Beide Gruppen mit hohen Abweichungen zum Durchschnitt hatten beim Modal Share des Pkw deutlich geringere Werte, wobei die umweltbewussten Agenten deutlich häufiger das Fahrrad und die Sparfüchse häufiger den ÖPNV nutzen.³¹

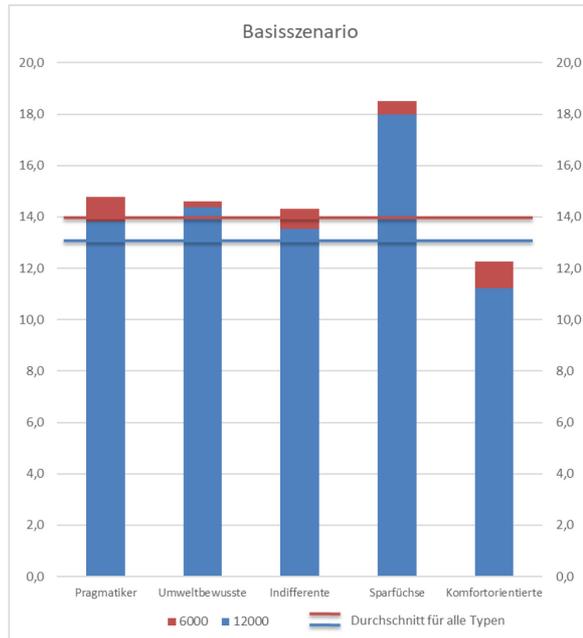


Abbildung 13: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario

In Abbildung 13 sind die durchschnittlichen SEU-Werte, also die individuell erreichte Präferenzenerfüllung der einzelnen Agententypen abgetragen. Wie zuvor steht die rote Linie für den Durchschnitt bei 6.000 Agenten und die blaue Linie für den Durchschnitt bei 12.000 Agenten. Die einzelnen SEU-Werte sind typspezifisch, ihre Höhe kann daher nicht zwischen den Typen verglichen werden. Ein Vergleich der Reaktion auf die Überlastung ist jedoch möglich. Mit der Überlastung ergeben sich für alle Agententypen geringere SEU-Werte, sie sind dementsprechend weniger zufrieden mit ihren getroffenen Entscheidungen. Die Einbußen sind jedoch insgesamt recht klein, die Präferenzenerfüllung gelingt den Agenten also immer noch gut. Für die umweltbewussten Agenten und die Sparfüchse sind die Einbußen noch geringer als für die übrigen Typen. Dies könnte an der geringeren Nutzung des Pkw liegen.

Zwischenfazit

Insgesamt zeigt sich, dass die Belastung des Systems mit doppelt so vielen Agenten deutliche negative Effekte hat. Die Emissionen steigen an, vor allem wenn die Emissionen sowohl auf Kanten als auch auf Knoten in Betracht gezogen werden. Die Werte für die Überlastung und die im Stau stehenden Agenten weisen ebenfalls einen Anstieg auf, was eine Verringerung der Netzeffizienz bedeutet. Der Anteil der Autofahrer sinkt, was grundsätzlich ein positiver Effekt ist. Die Emissionen sinken dadurch allerdings nicht, denn der Effekt ist auf die verlängerten Reisezeiten zurückzuführen, die den Pkw unattraktiver machen, aber auch die Emissionen steigen lassen.

³¹ Werte für Fahrrad- und ÖPNV-Nutzung sind hier nicht dargestellt.

Auch für die einzelnen Agenten hat die Überlastung des Systems negative Folgen. Für alle Agententypen verringert sich die Anzahl der erreichten Task-Knoten. Die Zielerreichung des einzelnen Agenten wird durch die Überlastung also erschwert. Es spricht außerdem für eine geringere Netzeffizienz. Die SEU-Werte und damit die Zufriedenheit der Agenten sinkt ebenfalls für alle Agententypen, wenn auch nicht sehr stark.

6.3 Starre Routenplanung

Netzeffizienz (Makroebene)

Das Szenario der starren Routenplanung geht davon aus, dass die Route vorab, z. B. mithilfe einer Straßenkarte, geplant und anschließend stur und ohne kurzfristige Änderungen befahren wird. In Tabelle 4 sind die Indikatoren für das Basisszenario und für die starre Routenplanung zu sehen. Die Werte für das Basisszenario entsprechen denen der Tabelle 3.

Szenario und Anzahl Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Modal Split			
						Pkw	Fahrrad	ÖPNV	
Basis-szenario	6000	10,1%	8,2%	22,8%	3,0%	0,0%	60,5%	32,1%	7,4%
	12000	13,1%	15,2%	43,0%	12,5%	14,8%	51,2%	35,5%	13,4%
Starre Routenplanung	6000	9,2%	14,0%	15,3%	1,0%	32,5%	75,0%	19,2%	5,7%
	12000	10,5%	29,8%	30,1%	5,1%	50,1%	74,0%	18,8%	7,3%

Tabelle 4: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die starre Routenplanung

Wird die Agentenzahl erhöht, zeigen sich bei starrer Routenplanung ähnliche Auswirkungen wie beim Basisszenario. Die Emissionen steigen an, ebenso die Auslastung und die Überlastung des Verkehrsnetzes. Lediglich im Modal Split sind Unterschiede in der Wirkrichtung zu erkennen.

Vergleicht man die Werte genauer, fällt auf, dass die Emissionen auf den Kanten nur gering von 9,2 auf 10,5 Prozent steigen. Die gesamten Emissionen steigen um 15,8 Prozentpunkte auf 29,8 Prozent an und sind somit deutlich höher als im Basisszenario, wo der Anstieg bei 7,0 Prozentpunkten liegt. Die verschiedenen Anstiege der Emissionswerte lassen sich durch die Auslastung und den Modal Split erklären. Der ohnehin hohe Modal Share des Pkw (75,0 Prozent) bleibt hoch, er sinkt nur um 1,0 Prozentpunkte auf 74,0 Prozent, wenn die Agentenzahl erhöht wird. Dadurch werden mehr Emissionen erzeugt. Die größere Differenz zwischen den Emissionen auf den Kanten und den Gesamtemissionen resultiert daraus, dass die Auslastung bei starrer Routenplanung weniger stark ansteigt. Auf den Kanten wird dementsprechend in einem geringeren Ausmaß emittiert als im Basisszenario. Die Gesamtemissionen sind hingegen höher, da neben dem höheren Pkw-Anteil auch mehr Agenten im Stau stehen und somit auf den Knoten emittieren.

Betrachtet man die Auslastungswerte an sich, könnte man zunächst annehmen, die starre Routenplanung führe zu einer höheren Netzeffizienz. Die Auslastung ist geringer und es gibt weniger überlastete Kanten als im Basisszenario (vgl. Tabelle 4). Bereits im Szenario mit 6.000 Agenten stehen jedoch 32,5 Prozent im Stau, bei 12.000 Agenten sind es sogar 50,1 Prozent. Dies verdeutlicht, dass die Netzeffizienz im Modus der starren Routenplanung – trotz scheinbar günstigerer Auslastungswerte – deutlich sinkt.³²

Die Pkw-Nutzung liegt bereits bei einer Population von 6.000 Agenten deutlich höher als im Basisszenario: 75 Prozent nutzen den Pkw, nur 19 Prozent das Fahrrad und nur 6 Prozent den ÖPNV. Zudem hat die Erhöhung der Agentenzahl nur einen marginalen Einfluss auf den Modal Split, der sich kaum verschiebt. Allerdings ist, wie oben beschrieben, die Netzeffizienz dieses Szenarios äußerst schlecht. Die hohen Anteile der Pkw-Nutzer lassen sich daher dadurch erklären, dass knapp die Hälfte der Agenten auf ihren Knoten feststeckt und deshalb für einen längeren Zeitraum keinen Home-Knoten aufsuchen kann, welcher einen Technologiewechsel ermöglicht hätte. Im Basisszenario stehen deutlich weniger Agenten im Stau, ein Technologiewechsel ist dementsprechend öfter möglich.

Abweichung vom Basisszenario bei jeweils 12.000 Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Modal Share Pkw	Korrekt erreichte Task-Knoten	SEU Mittelwert
Starre Routenplanung	-2,5	14,7	-12,9	-7,4	27,9	22,8	-32,6	3,7
Einheit:	Prozentpunkte					Prozent		

Positiv:			Negativ:		
<5%	>5%	>10%	<5%	>5%	>10%

Tabelle 5: Vergleich der starren Routenplanung mit dem Basisszenario

Um den Vergleich zwischen den Szenarien deutlicher zu machen, zeigt Tabelle 5 die Abweichung der starren Routenplanung vom Basisszenario. Hieraus wird deutlich, welche Indikatoren sich durch die Einführung des Governance-Modus positiv oder negativ verändern und zwar im direkten Vergleich der Szenarien mit 12.000 Agenten. Die Tabelle ist je nach Effektstärke hell oder dunkel eingefärbt. Hat sich ein Indikator in eine gesellschaftlich wünschenswerte Richtung verändert, ist der Wert grün markiert. Hat er sich in eine weniger wünschenswerte Richtung verändert, ist der Wert rot markiert.

Für die starre Routenplanung haben sich nur drei Werte positiv verändert. Die Emissionen auf den Kanten und der Anteil überlasteter Kanten sind leicht gesunken, die

³² Die Auslastungs- und Überlastungswerte beziehen sich auf Agenten, die sich auf Kanten befinden. Die im Stau stehenden Agenten stecken allerdings auf Knoten fest, und lassen dadurch die Auslastungswerte zu niedrig erscheinen.

SEU-Werte leicht gestiegen. Zieht man hier jedoch in Betracht, dass die gesamten Emissionen auf Kanten und Knoten deutlich gestiegen sind, relativiert sich das Ergebnis für die Emissionen auf den Kanten. Auch der positive Rückgang an überlasteten Kanten relativiert sich mit Blick auf die deutlich gestiegene Anzahl der Agenten im Stau. Tatsächlich konnten sowohl die Emissionen auf den Kanten als auch der Anteil überlasteter Kanten nur sinken, weil so viele Agenten im Stau stehen. Anhand der korrekt erreichten Task-Knoten zeigt sich ebenfalls, wie stark die Netzeffizienz gesunken ist: Es werden über 30 Prozent weniger Knoten erreicht. Insgesamt zeigt sich so ein negatives Bild dieses Governance-Modus, denn die Emissionen steigen, die Netzeffizienz sinkt, die Agenten erreichen weniger Knoten und haben keine bessere Präferenzenerfüllung. Im Vergleich zum Basisszenario bietet die starre Routenplanung also keine gesellschaftlich wünschenswerte Alternative.

Zielerreichung (Mikroebene)

Der Modal Share des Pkw für die einzelnen Agententypen ist in Abbildung 14 zu sehen.

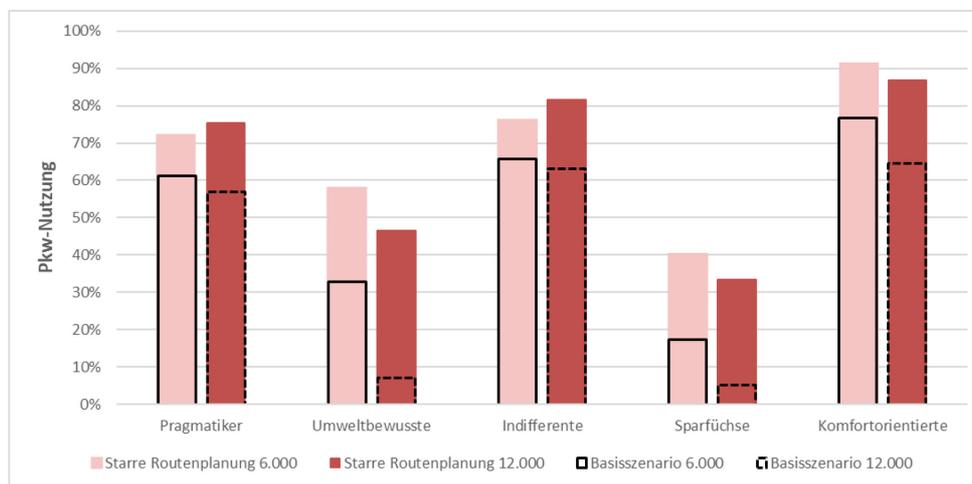


Abbildung 14: Pkw-Nutzung nach Agententypen für die starre Routenplanung

Im Durchschnitt lag der Anteil der Pkw-Nutzung für das Basisszenario bei 60 und für die starre Routenplanung bei 75 Prozent (siehe Tabelle 4). Die Pkw-Nutzung der pragmatischen und indifferenten Agenten liegt mit 72 und 76 Prozent nah am Durchschnittswert der starren Routenplanung. Im Vergleich zum Basisszenario steigt jedoch der Anteil des Pkw, wenn die Agentenzahl erhöht wird. Diese Agententypen reagieren hier wie im Basisszenario nicht mit einem Technologiewechsel auf die Überlastung des Systems. Bei den Komfortorientierten liegt der Anteil der Pkw-Nutzung in beiden Szenarien am höchsten und über dem Durchschnitt. Bei den Umweltbewussten und den Sparfüchsen ist er, wie zuvor, am geringsten. Im Modus der starren Routenplanung reagieren diese drei Agententypen jedoch weniger stark mit einem Technologiewechsel, wenn die Population steigt. So sinkt der Anteil der Pkw-

Nutzer bei den Umweltbewussten nur um ca. 9 Prozentpunkte. Im Basisszenario waren es noch ca. 34 Prozent.

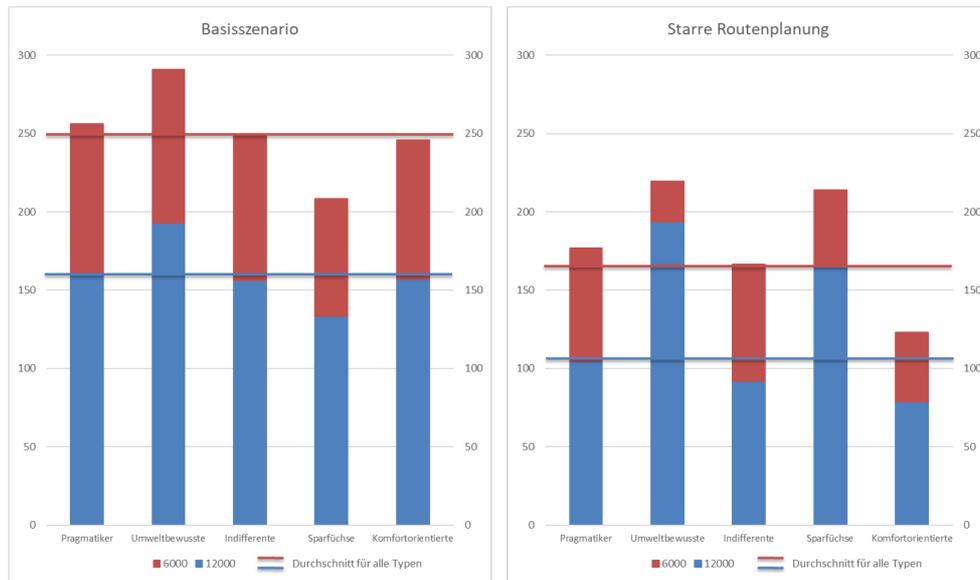


Abbildung 15: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei starrer Routenplanung

Abbildung 15 stellt die erreichten Task-Knoten der verschiedenen Agententypen dar. Für die starre Routenplanung liegen die Durchschnittswerte deutlich unter denen des Basisszenarios. Konnten die Agenten im Basisszenario bei 6.000 Agenten noch ca. 250 Knoten erreichen, so sind es bei starrer Routenplanung nur ca. 160 Knoten. Steigt die Agentenzahl, werden sogar nur ca. 105 Knoten erreicht. Wie beim Basisszenario sind diese Ergebnisse konsistent mit denen auf der Makroebene und spiegeln eine schlechtere Netzeffizienz wider. Der in Tabelle 5 aufgezeigte starke Rückgang der erreichten Task-Knoten von 32,6 Prozent ist hier auch grafisch deutlich zu erkennen. Innerhalb der starren Routenplanung zeigen die einzelnen Typen bei Überlastung des Systems volatilere Reaktionen als im Basisszenario. Die Pragmatiker, die indifferenten und die komfortorientierten Agenten erreichen weniger Knoten und müssen bei Überlastung weitere Einbußen ihres Zielerreichungsgrades hinnehmen. Bei umweltbewussten Agenten ist die Einbuße kleiner als im Basisszenario, und sie erreichen mehr Task-Knoten als der Durchschnitt der Agenten bei der starren Routenplanung. Die Sparfüchse erreichen bei beiden Populationsgrößen sogar mehr Knoten als im Basisszenario.

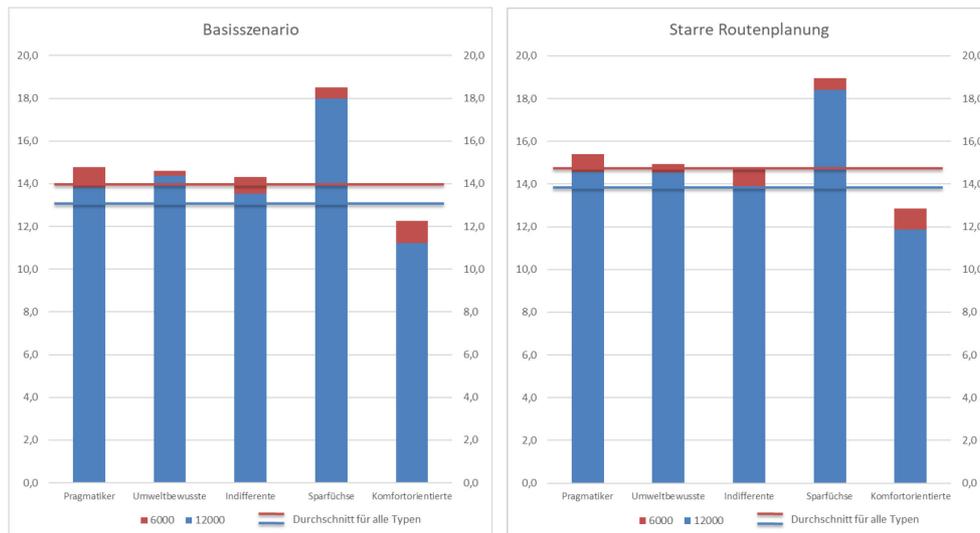


Abbildung 16: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei starrer Routenplanung

Abbildung 16 zeigt die Auswirkung der Erhöhung der Agentenzahl auf die SEU-Werte für das Basisszenario und die starre Routenplanung. Innerhalb beider Szenarien verringert sich der SEU-Wert durch die Überlastung für jeden der Agententypen. Der Rückgang ist grafisch jedoch kaum von dem des Basisszenarios zu unterscheiden. Anhand der Farbcodierung in Tabelle 5 bestätigt sich die grafische Auswertung der SEU-Werte, die nur eine geringe Abweichung von 3,7 Prozent nach oben aufweisen. Demnach ist die Präferenzenerfüllung ähnlich dem Basisszenario weiterhin hoch. Die durchschnittlichen SEU-Werte bei starrer Routenplanung sind außerdem höher. Sie liegen bei geringer und hoher Population bei ca. 14 bzw. 15 im Vergleich zu ca. 13 und 14 im Basisszenario.

Zwischenfazit

Auch für die starre Routenplanung führt eine Erhöhung der Population zu starken negativen Effekten. Die Emissionen steigen stärker an, die Netzeffizienz ist geringer als im Basisszenario und sinkt zudem deutlicher. Denn das Straßennetz ist bei 6.000 Agenten bereits überlastet. Zudem ist die Pkw-Nutzung höher und sinkt nur unwesentlich, wenn die Agentenzahl steigt.

Die Agenten erreichen bei starrer Routenplanung im Durchschnitt wesentlich weniger Knoten, was die geringere Netzeffizienz bestätigt. Umweltbewusste Agenten und Sparfüchse bilden hier allerdings eine Ausnahme. Erstere reagieren bei starrer Routenplanung nur geringfügig auf die Erhöhung der Agentenzahl und erreichen immer noch viele Knoten. Letztere erreichen sogar mehr Knoten als im Basisszenario. Die SEU-Werte weisen hingegen keine nennenswerten Veränderungen auf.

6.4 Intelligente Navigation

Netzeffizienz (Makroebene)

In Tabelle 6 sind die Simulationsergebnisse für das Basisszenario und für den Governance-Modus der intelligenten Navigation zu sehen.

Szenario und Anzahl Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Pkw	Fahrrad	ÖPNV	
Basis-szenario	6000	10,1%	8,2%	22,8%	3,0%	0,0%	60,5%	32,1%	7,4%
	12000	13,1%	15,2%	43,0%	12,5%	22,2%	51,2%	35,5%	13,4%
Intelligente Navigation	6000	13,4%	10,9%	22,7%	0,8%	0,0%	65,0%	27,4%	7,6%
	12000	17,9%	17,3%	50,9%	8,5%	8,6%	60,6%	28,7%	10,7%

Tabelle 6: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die intelligente Navigation

Vergleicht man dieses Szenario mit den vorherigen Ergebnissen, so zeigen sich für alle Indikatoren die gleichen Wirkrichtungen wie im Basisszenario, wenn das System mit einer höheren Agentenzahl belastet wird. Die Emissionen steigen, die Auslastung und die Überlastung ebenso. Der Modal Split verschiebt sich zu Ungunsten des Pkw.

Betrachtet man die Emissionen genauer, fallen zunächst die höheren durchschnittlichen Emissionen auf. Sie liegen mit 13,4 Prozent um 3,3 Prozentpunkte über den Werten des Basisszenarios. Wenn die Agentenzahl hoch ist, liegen sie bei 17,9 Prozent. Der Unterschied vergrößert sich somit auf 4,8 Prozentpunkte. Dies ist auf die höhere durchschnittliche Nutzung des Pkw zurückzuführen, die ebenfalls über der des Basisszenarios liegt, und die weniger stark sinkt, wenn die Population steigt. Die intelligente Navigation führt also einerseits dazu, dass mehr Strecken mit dem Pkw gefahren werden, was die Emissionen erhöht. Andererseits stecken selbst bei einer großen Population weniger Agenten fest: Selbst bei 12.000 Agenten sind dies im Mittel nur 8,6 Prozent der Agenten, im Basisszenario hingegen 22,2 Prozent und bei starrer Routenplanung sogar 50,1 Prozent. Die Unterschiede zwischen den Emissionen auf den Kanten und den Gesamtemissionen sind bei intelligenter Navigation aus diesem Grund sehr gering, es stehen wenig Agenten im Stau, die auf den Knoten emittieren könnten.

Bei einer kleinen Agentenpopulation ist die Auslastung im Basisszenario sowie bei der intelligenten Navigation in etwa gleich. Wird die Population erhöht, steigt die Auslastung bei der intelligenten Navigation stärker an. Die Überlastung, gemessen an überlasteten Kanten und feststeckenden Agenten, ist hingegen durchweg geringer. Im Gegensatz zum Basisszenario bei 12.000 Agenten sind nur 8,5 statt 12,5 Prozent der Kanten überlastet und es stehen deutlich weniger Agenten im Stau. Der Verkehr wird mittels der Echtzeitnavigation also besser verteilt. Die Anzahl der Staus nimmt merklich ab, und die Netzeffizienz verbessert sich durch die intelligente Navigation mit Echtzeitinformationen enorm. Beides, die höheren Emissionswerte und die bessere Verteilung, spricht dafür, dass die dynamische Navigation auf Basis von Echtzeitinformationen die Mobilität der Agenten, den Verkehrsfluss und damit die Auslastung des Netzes erhöht, per Saldo aber die Umweltbilanz verschlechtert.

Die Pkw-Nutzung ist mit 65,0 Prozent um 4,5 Prozentpunkte höher als im Basisszenario, sie ist jedoch geringer als bei der starren Routenplanung, dort lag sie bei 75,0 Prozent. Der Anteil sinkt mit der Agentenzahl um 4,4 Prozentpunkte auf 60,6 Prozent ab. Im Vergleich dazu sinkt der Anteil im Basisszenario um 9,3 Prozentpunkte, der Effekt ist also ähnlich, wenn auch nicht so stark. Die Modal Shares für das Fahrrad und den ÖPNV steigen an. Aufgrund des geringen Rückgangs der Pkw-Nutzung

ist dieser Anstieg kleiner als im Basisszenario. Die höhere Nutzung des Pkw und der schwache Rückgang bei Erhöhung der Agentenzahl sind auf die höhere Netzeffizienz zurückzuführen. Da auch bei Belastung des Systems die Reisezeiten vergleichsweise gering bleiben, haben die Agenten keinen Anreiz, vom Pkw auf einen anderen Verkehrsträger umzusteigen. Die höhere Effizienz führt zu einem klassischen Rebound-Effekt.

Tabelle 7 zeigt die Abweichung der intelligenten Navigation von den Werten des Basisszenarios.³³

Abweichung vom Basisszenario bei jeweils 12.000 Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Modal Share Pkw	Korrekt erreichte Task-Knoten	SEU Mittelwert
Intelligente Navigation	4,8	2,1	7,9	-4,1	-13,6	9,4	0,6	1,8
Einheit:	Prozentpunkte						Prozent	
Positiv:			Negativ:					
<5%	>5%	>10%	<5%	>5%	>10%			

Tabelle 7: Vergleich der intelligenten Navigation mit dem Basisszenario

Im direkten Vergleich wird deutlich, dass sich durch die Einführung der intelligenten Navigation keine starken Emissionssteigerungen ergeben. Für die Netzeffizienz ergeben sich durchweg Verbesserungen. Bei den Agenten im Stau ist ein Rückgang von 13,6 Prozentpunkten zu beobachten, aber auch die Überlastung sinkt leicht, und die Auslastung der Kanten steigt. Im Gegensatz dazu ist der Anteil der Pkw-Nutzung um ca. neun Prozentpunkte höher als im Basisszenario. Die Indikatoren der Mikroebene weisen kaum Abweichungen auf: Es werden etwas mehr Knoten erreicht, und die Präferenz Erfüllung ist unwesentlich höher.

Insgesamt zeigt sich keine nennenswerte Erhöhung der Emissionen, die Indikatoren für die Netzeffizienz weisen hingegen deutliche positive Werte auf. Im Gegensatz zur starren Routenplanung ist die intelligente Navigation als Governance-Modus also vorzuziehen.

Zielerreichung (Mikroebene)

Abbildung 17 zeigt den Modal Share des Pkw für die verschiedenen Agententypen. Der Anteil der Pkw-Nutzer der pragmatischen und indifferenten Agenten entspricht zunächst fast der Pkw-Nutzung im Basisszenario.

³³ Wie zuvor ist die Tabelle je nach Effektstärke hell oder dunkel eingefärbt. Hat sich ein Indikator in eine gesellschaftlich wünschenswerte Richtung verändert, ist der Wert grün markiert. Hat er sich in eine weniger wünschenswerte Richtung verändert ist der Wert rot markiert.

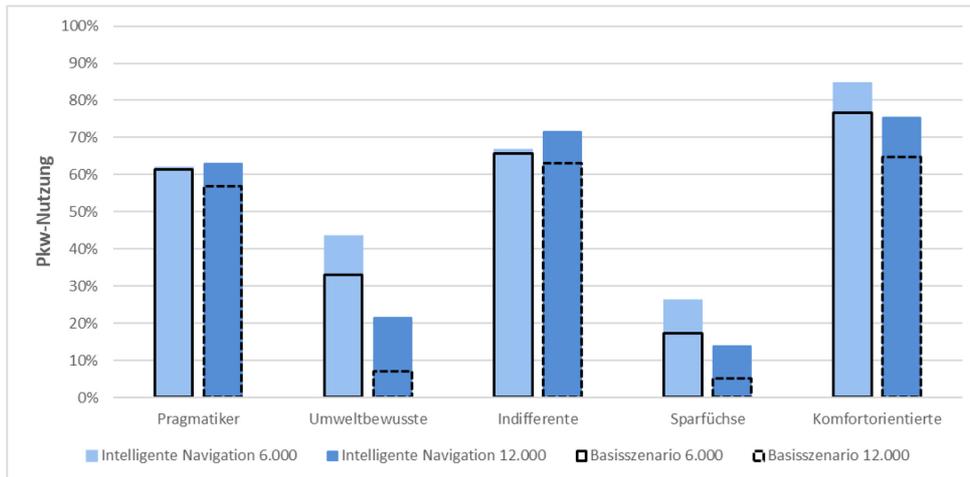


Abbildung 17: Pkw-Nutzung nach Agententypen für die intelligente Navigation

Ähnlich wie bei starrer Routenplanung steigt jedoch der Anteil der Pkw-Nutzer, wenn die Agentenzahl steigt. Es kommt nicht zu einem Technologiewechsel. Umweltbewusste Agenten, Sparfüchse und komfortorientierte Agenten weisen hingegen durchweg eine höhere Nutzung des Pkw auf als im Basisszenario. Die Pkw-Nutzung dieser Agententypen sinkt jedoch, wenn die Population erhöht wird. Für umweltbewusste Agenten liegt der Rückgang bei ca. 22 Prozent und somit zwischen den Werten für starre Routenplanung (ca. 9 Prozent) und Basisszenario (ca. 34 Prozent). Die drei letztgenannten Agententypen reagieren also stärker auf eine Erhöhung der Agentenzahl als unter starrer Routenplanung, jedoch nicht so stark wie im Basisszenario.

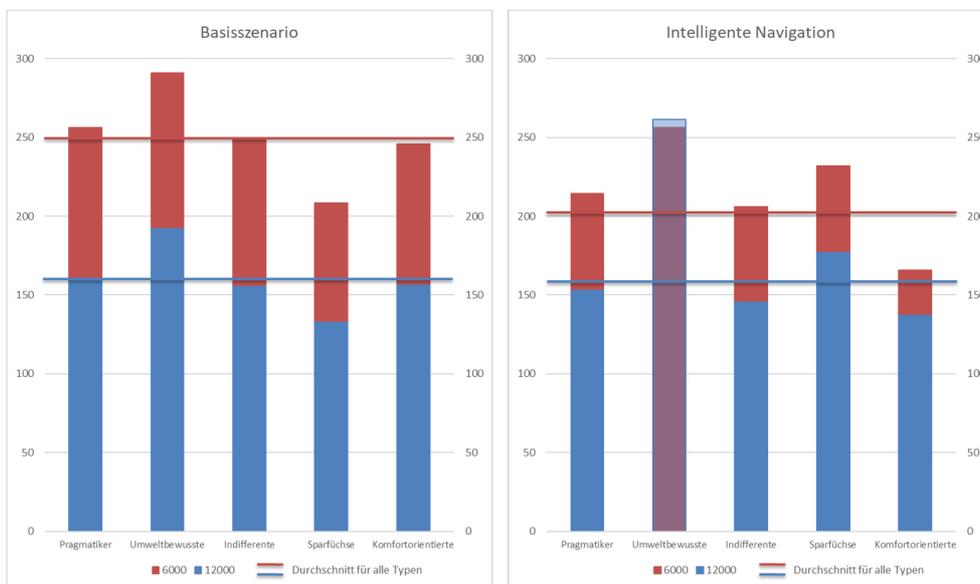


Abbildung 18: Korrekt erreichte Task-Knoten der Agententypen im Basisszenario und bei intelligenter Navigation

Die durchschnittliche Zielerreichung der Agenten, zu sehen an den roten durchgezogenen Linien in Abbildung 18, ist bei intelligenter Navigation und 6.000 Agenten geringer als im Basisszenario; bei 12.000 Agenten (blaue Linie) ist der Durchschnittswert fast genauso hoch wie im Basisszenario. Die Zielerreichung sinkt im Fall der intelligenten Navigation also weniger stark, wenn mehr Agenten das System

belasten. Zwar ist die Zielerreichung ohne Überlastung geringer, aber die Robustheit im Fall der Überlastung ist ein Indiz für die positive Wirkung dieses Governance-Modus auf die Netzeffizienz. Die Anzahl der erreichten Knoten weist für die Pragmatiker und die indifferenten Agenten keine Besonderheiten auf; beide Werte liegen nah an den Durchschnittswerten. Umweltbewusste Agenten erreichen bei intelligenter Navigation und hoher Population sogar mehr Knoten als im Basisszenario. Bei den Sparfüchsen gilt dies für beide Populationsgrößen. Die komfortorientierten Agenten erreichen hingegen weniger Knoten.

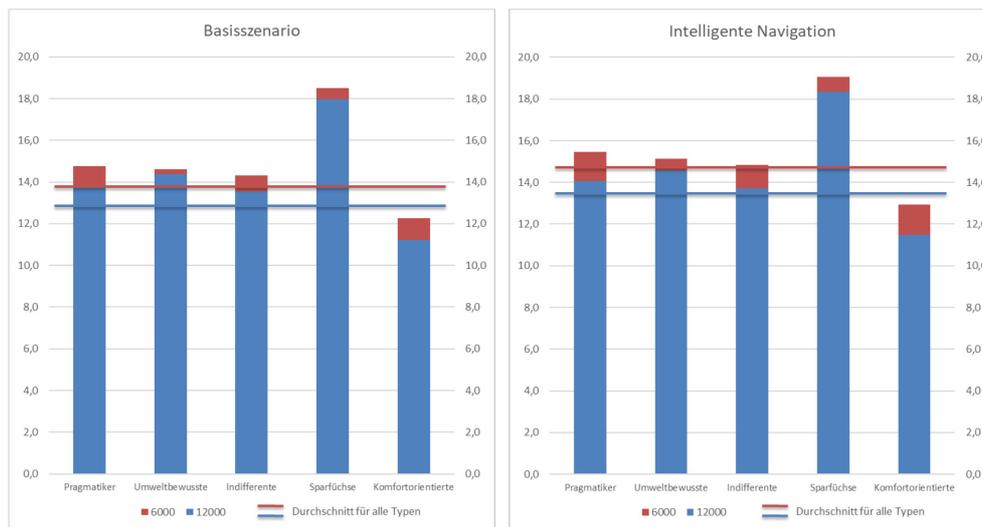


Abbildung 19: SEU-Werte der Agenten und der einzelnen Agententypen im Basisszenario und bei intelligenter Navigation

Bei der Präferenz Erfüllung, zu sehen in Abbildung 19, sind, genau wie im Fall der starren Routenplanung, für die intelligente Navigation keine auffälligen Änderungen im Vergleich zum Basisszenario zu erkennen. Die durchschnittlichen SEU-Werte liegen bei intelligenter Navigation nur geringfügig höher, nämlich 1,8 Prozent bei hoher Population (vgl. Tabelle 7). Bei einer Belastung des Verkehrssystems mit mehr Agenten sinken die SEU-Werte jedoch etwas stärker, von ca. 15,0 auf 13,5 bei intelligenter Navigation im Vergleich zu ca. 13,8 auf 13,0 im Basisszenario. Diese Unterschiede sind eher klein, deuten jedoch auf einen Trade-off zwischen der erhöhten Effizienz durch die Navigation mit Echtzeitdaten und der Präferenz Erfüllung der Agenten hin.

Zwischenfazit

Der Governance-Modus der intelligenten Navigation führt insgesamt zu einer deutlichen Steigerung der Netzeffizienz, ablesbar an der höheren Auslastung, der geringeren Anzahl überlasteter Kanten wie auch der Agenten im Stau. Die Emissionen steigen allerdings an, und es scheint einen Trade-off zwischen Emissionsausstoß und Netzeffizienz zu geben. Dieser Trade-off könnte die Folge eines Rebound-Effekts sein: Der Anteil der Pkw-Nutzer ist höher und sinkt bei Überlastung des Systems weniger stark ab. Da die Netzeffizienz hoch bleibt (und die Agenten daher keine längeren Fahrtzeiten in Kauf nehmen müssen), besteht offenbar kein Anreiz, das Verkehrsmittel zu wechseln und auf den Pkw zu verzichten. Die Effizienzgewinne der intelligenten Navigation schlagen sich somit nicht in einer Verringerung der Emissionen nieder.

Der Governance-Modus verschlechtert also die Umweltbilanz im Vergleich zum Basisszenario, ablesbar an höheren Emissionen auf Kanten und Knoten, die zwar mit 2,1 Prozentpunkten nicht drastisch ausfällt, aber dennoch zeigt, dass sich der politisch gewünschte Effekt auf diese Weise nicht erzielen lässt.

Auf der Mikroebene bestätigt sich die gestiegene Netzeffizienz insofern, als auch bei hoher Agentenzahl noch viele Knoten erreicht werden und die Anzahl der erreichten Knoten in Folge der Überlastung weniger stark sinkt als im Basisszenario. Die SEU-Werte und somit die Präferenz Erfüllung liegen bei intelligenter Navigation durchschnittlich leicht über den Werten des Basisszenarios. Der Rückgang bei steigender Agentenzahl ist allerdings höher. Insgesamt gibt es für die intelligente Navigation keine großen Abweichungen bei der Präferenz Erfüllung.

6.5 Koordinierter Modus

Dieses Kapitel diskutiert nur die wichtigsten Indikatoren für den koordinierten Modus im Vergleich zur intelligenten Navigation und zum Basisszenario. Dieser Vergleich soll hier ausreichen, da der Governance-Modus eine Erweiterung der intelligenten Navigation derart darstellt, dass ein zusätzliches Kantengewicht in die Routenberechnung eingeht, das aus den Emissionen resultiert (siehe Kapitel 5.4). Damit beruht die Navigation einerseits auf dem effizienzbasierten Ziel, die schnellste Route zu fahren, und andererseits auf dem politisch und gesellschaftlich motivierten Ziel der Emissionsenkung.

Szenario und Anzahl Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	PKW	Fahrrad	ÖPNV	
Intelligente Navigation	6000	13,4%	10,9%	22,7%	0,8%	0,0%	65,0%	27,4%	7,6%
	12000	17,9%	17,3%	50,9%	8,5%	8,6%	60,6%	28,7%	10,7%
Koordinierter Modus	6000	13,1%	10,7%	22,8%	1,0%	0,0%	64,5%	27,7%	7,8%
	12000	17,1%	18,1%	49,1%	9,3%	11,5%	60,6%	28,6%	10,8%

Tabelle 8: Emissionen, Auslastung und Modal Split für die intelligente Navigation und den koordinierten Modus

Wie Tabelle 8 zeigt, entstehen beim koordinierten Modus durch die Überlastung des Systems ähnliche Effekte wie bei der intelligenten Navigation: Die Emissionen steigen, die Netzeffizienz sinkt, und der Anteil des Pkw sinkt. Die interne Robustheit bleibt also nahezu unverändert.

Im Vergleich zum Basisszenario erzeugt der koordinierte Modus ähnliche Ergebnisse wie die intelligente Navigation (vgl. Tabelle 9): Die Emissionen auf Knoten und Kanten steigen leicht, und die Netzeffizienz (Auslastung, Überlastung, Stau) verbessert sich, wenngleich nicht ganz so stark. Auch beim Modal Share und bei der Zielerreichung (erreichte Knoten, SEU) schneidet der koordinierte Modus etwas schlechter ab als die intelligente Navigation.

Aufschlussreich ist auch der direkte Vergleich der beiden Governance-Modi in Tabelle 9, der die Veränderungen (jeweils gegenüber dem Basisszenario) auflistet.³⁴ Betrachtet man die beiden Indikatoren für Emissionen, so sieht man nur unwesentliche Veränderungen: in einem Fall eine leichte Verbesserung (von 4,8 auf 4,1 Prozentpunkte), im anderen eine leichte Verschlechterung (von 2,1 auf 2,9 Prozentpunkte). Der koordinierte Modus leistet also nicht das, was von ihm erwartet wird: einen wirkungsvollen Beitrag zur Senkung der Emissionen.

Abweichung vom Basisszenario bei jeweils 12.000 Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Modal Share Pkw	Korrekt erreichte Task-Knoten	SEU Mittelwert
Intelligente Navigation	4,8	2,1	7,9	-4,1	-13,6	9,4	0,6	1,8
Koordinierter Modus	4,1	2,9	6,2	-3,3	-10,7	9,5	-1,8	0,8
Einheit:	Prozentpunkte						Prozent	

Positiv:			Negativ:		
<5%	>5%	>10%	<5%	>5%	>10%

Tabelle 9: Vergleich von koordiniertem Modus und intelligenter Navigation mit dem Basisszenario

In Bezug auf die Netzeffizienz schneidet der koordinierte Modus bei allen drei Indikatoren sogar leicht schlechter ab: die Verbesserung der Auslastung ist geringer (plus 6,2 statt 7,9 Prozentpunkte – jeweils bezogen auf das Basisszenario), die Anzahl der überlasteten Kanten sinkt weniger stark (minus 3,3 statt minus 4,1 Prozentpunkte), und auch bei den Agenten im Stau fällt die Verbesserung mit minus 10,7 Prozentpunkten (statt minus 13,6) geringer aus. Diese Werte stellen zwar – zumindest wenn man sie mit dem Basisszenario vergleicht – eine Verbesserung dar; sie zeigen aber auch, dass der koordinierte Modus die in ihn gesetzten Hoffnungen bislang nicht erfüllen kann.

³⁴ Wie zuvor ist die Tabelle je nach Effektstärke hell oder dunkel eingefärbt. Hat sich ein Indikator in eine gesellschaftlich wünschenswerte Richtung verändert, ist der Wert grün markiert. Hat er sich in eine weniger wünschenswerte Richtung verändert ist der Wert rot markiert.

Dies lässt sich beispielsweise am Anteil des Pkw am Modal Share ablesen, der um 9,5 Prozentpunkte und damit fast genauso stark wie bei der intelligenten Navigation (9,4 Prozentpunkte) zunimmt, aber auch an den subjektiven Zufriedenheitswerten (erreichte Task-Knoten, SEU), die niedriger liegen als bei der intelligenten Navigation. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die politisch gewollte Verkehrssteuerung auf Akzeptanzprobleme stoßen könnte, wenn sie nicht mit einem deutlichen Gewinn für die betroffenen Individuen verbunden ist.

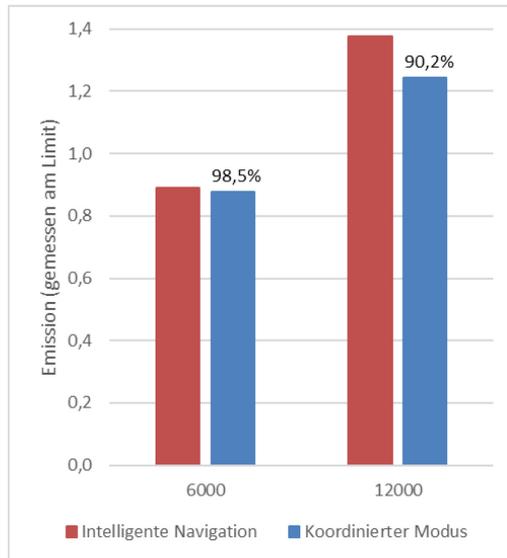


Abbildung 20: Maximale Emissionen auf den Kanten für intelligente Navigation und koordinierten Modus

Auch wenn die erhoffte Minderung der Gesamtemissionen durch den koordinierten Modus nicht eingetreten ist, so zeigt doch Abbildung 20, dass die maximalen Emissionen, also die Werte für die Kante mit der höchsten Emission über den gesamten Simulationslauf, gesenkt werden konnten.³⁵ Diese verringern sich bei 6.000 Agenten zwar nur geringfügig, bei einer hohen Population dann aber deutlich auf nur noch 90,2 Prozent der Emissionen (im Vergleich zur intelligenten Navigation).

Zwischenfazit

Insgesamt unterscheiden sich die verkehrs- und umweltpolitisch relevanten Effekte, die sich im koordinierten Governance-Modus erzielen lassen, nur unwesentlich von denen, die sich durch intelligente Navigation ergeben. In den meisten Fällen sind die Werte sogar etwas schlechter. Vor allem werden die Emissionen durch die koordinierte Verwendung von Echtzeitverkehrs- und Echtzeitemissionsdaten nicht gesenkt. Bei den lokalen Maxima ließ sich jedoch ein spürbarer Effekt nachweisen.

Zwar stellen beide Governance-Modi eine Verbesserung im Vergleich zum Basisszenario dar, indem sie die Netzeffizienz steigern. Aber dies geht nicht mit einer Senkung der Emissionen bzw. einer spürbaren Veränderung des Modal Split einher. Im Gegenteil: Der Pkw profitiert von der Möglichkeit, die Route zu optimieren.

³⁵ Die Abbildung zeigt die Durchschnittswerte aller Maxima für sämtliche Simulationsläufe mit 6.000 bzw. 12.000 Agenten.

7 Fazit

Big Data im Verkehr

Der Ausgangspunkt dieser Studie besteht in der Beobachtung, dass Big Data, also die Sammlung und Verarbeitung großer Datenmengen, eine Echtzeitsteuerung komplexer Systeme ermöglicht, beispielsweise des Straßenverkehrs. Stationäre Sensoren wie fest verbaute Induktionsschleifen, aber auch eine zunehmende Zahl mobiler Sensoren, beispielsweise unsere Smartphones, produzieren jederzeit große Mengen von Daten über die aktuelle Verkehrssituation, die es ermöglichen, Lagebilder zu generieren und auf dieser Grundlage Hinweise und Empfehlungen an die Nutzer*innen zu übermitteln. Diesen steht damit die Option offen, ihre Entscheidungen bezüglich Verkehrsmittel- und Routenwahl zu überdenken und an die veränderte Situation anzupassen. Unterschiedliche private Dienstleister haben diesen Service bereits realisiert, und das Verkehrsmanagement der öffentlichen Hand drängt zunehmend in diesen Bereich ein, um den Verkehr nicht nur effizient, sondern auch nachhaltig zu gestalten.

Die theoretische Durchdringung dieses neuen Governance-Modus der zentralen Steuerung dezentraler Systeme steht noch am Anfang; zudem mangelt es an empirisch fundiertem Wissen über Funktionsweise von Echtzeitsteuerung.

Governance

Die vorliegende Studie hat einen theoretisch-konzeptionellen Vorschlag unterbreitet, die Steuerung komplexer soziotechnischer Systeme in einem Mehrebenen-Modell von Governance zu beschreiben und zu analysieren, das in seinem Kern auf dem bekannten Makro-Mikro-Makro-Modell basiert, dies aber zu einem verschachtelten Mehrebenen-System weiterentwickelt.

Dies bildet zugleich die Grundlage für experimentelle Studien, die sich der Methode der agentenbasierten Modellierung bedienen, um die Prozesse, aber auch die Datenströme in einem artifiziellen Verkehrssystem abzubilden. Wir haben gezeigt, dass es möglich ist, komplexe soziotechnische Systeme, in denen die Agenten große Mengen Daten produzieren, im Computer zu simulieren und die Entscheidungsprozesse der individuellen Agenten, aber auch die steuernden Interventionen externer Instanzen – z. B. der Umwelt- oder Verkehrspolitik – abzubilden, die sich dabei der Techniken der Echtzeitdatenverarbeitung und der Echtzeitsteuerung bedienen.

Szenarien

Der Simulator SimCo hat uns ermöglicht, die hier verfolgten Fragestellungen experimentell zu untersuchen – mit teilweise überraschenden Ergebnissen. Dabei konnten wir auf ein validiertes Basisszenario zurückgreifen, das das Verkehrssystem einer mittleren Großstadt abbildet und zudem die Handlungslogiken unterschiedlicher Agententypen beinhaltet, die aufgrund ihrer jeweiligen Präferenzen in unterschiedlicher Weise auf externe Anreize reagieren.

Dieses Szenario, das bereits etliche Elemente von Echtzeitsteuerung enthält, mussten wir zunächst künstlich verschlechtern, um den konventionellen Modus der starren

Routenplanung der Vergangenheit (am Abend zuvor mit Straßenkarte bzw. Bahnfahrplan) abzubilden. Da die Nutzer*innen in diesem Szenario keinerlei Informationen über die aktuelle Verkehrssituation erhalten, verfolgen sie den vorab festgelegten Plan stur und unbeirrt.

Das Szenario der intelligenten Navigation spiegelt hingegen den aktuellen Ist-Zustand wider, in dem die Nutzer*innen Echtzeitinformationen erhalten und so ihre Routenplanung ad hoc anpassen können.

Das Szenario des koordinierten Modus ist hingegen eine Art Zukunftsprojektion, die von Verkehrsplanern und Verkehrswissenschaftlern derzeit intensiv diskutiert wird, nämlich eine zusätzliche Berücksichtigung umweltpolitischer und verkehrsplanerischer Zielvorgaben bei der Generierung der Empfehlungen zur Verkehrsmittel- bzw. Routenwahl.

Ergebnisse

Alle vier von uns untersuchten Szenarien sind sensitiv gegenüber einer Vergrößerung der Agentenzahl von 6.000 auf 12.000 Agenten. Die Auslastung, die Überlastung und die Emissionen steigen mit der Agentenzahl. Durch die Variation unserer Experimente ist es gelungen, das System unter Druck zu setzen. Dies zeigt sich bereits beim Basisszenario, das bei einer geringen Agentenzahl problemlos funktioniert, bei steigender Agentenzahl jedoch große Mengen Staus produziert und es zudem den Agenten erschwert, ihre Ziele zu erreichen.

Abweichung vom Basisszenario bei jeweils 12.000 Agenten	Emissionen auf den Kanten	Emissionen auf Kanten und Knoten	Auslastung der Kanten	Überlastete Kanten	Agenten im Stau	Modal Share Pkw	Korrekt erreichte Task-Knoten	SEU Mittelwert
Starre Routenplanung	-2,5	14,7	-12,9	-7,4	27,9	22,8	-32,6	3,7
Intelligente Navigation	4,8	2,1	7,9	-4,1	-13,6	9,4	0,6	1,8
Koordinierter Modus	4,1	2,9	6,2	-3,3	-10,7	9,5	-1,8	0,8
Einheit:	Prozentpunkte						Prozent	

Positiv:			Negativ:		
<5%	>5%	>10%	<5%	>5%	>10%

Tabelle 10: Gesamtübersicht der Governance-Modi im Vergleich zum Basisszenario

Tabelle 10 zeigt den Vergleich aller Szenarien mit dem Basisszenario, also der dezentralen Selbstorganisation. Die starre Vorab-Routenplanung überzeugt weder bei Netzeffizienz, Emissionsausstoß noch dem Modal Split und verringert außerdem die Anzahl der von den Agenten erreichten Knoten. Mit intelligenter Navigation kann

die Netzeffizienz deutlich gesteigert werden, ohne übermäßige Emissionssteigerungen zu verursachen. Der Modal Split ist schlechter als im Basisszenario, jedoch nicht so schlecht wie bei starrer Routenplanung. Im koordinierten Modus zeigen sich die gleichen Effekte: Die Netzeffizienz wurde erhalten und der Modal Split ist schlechter. Eine Emissionssenkung konnte mit diesem Modus nicht erreicht werden. Im Vergleich zur Navigation ohne Echtzeitinformationen über die Emissionen können mit der Koordination jedoch die Maximalwerte abgeschwächt werden.

Das Szenario der starren Routenplanung zeigt, verglichen mit dem Basisszenario, zunächst eine Verbesserung der Werte für Emissionen sowie für überlastete Kanten. Dies relativiert sich aber, wenn man den Wert für die Emissionen auf Knoten und Kanten in Betracht zieht und zudem berücksichtigt, dass dieses Szenario höchst ineffizient ist, weil es mit einer schlechten Auslastung der Kanten und einer hohen Zahl von Agenten im Stau einhergeht. Es gibt zwar augenscheinlich weniger Staus und Emissionen, aber auch eine schlechtere Auslastung des Netzes – mit der Folge, dass die Agenten in großer Zahl auf Knoten festhängen (und dort Emissionen produzieren). Ihre starrsinnige Routenplanung ist äußerst ineffizient; die weniger belasteten Kanten erreichen sie nicht. Zudem verschlechtert sich der Modal Split deutlich, da die Agenten wenig Möglichkeiten haben, ihr Verkehrsmittel zu wechseln. Auf der Mikroebene zeigt sich, dass die Präferenzen der Agenten noch gut erfüllt werden können. Sie erreichen jedoch deutlich weniger Knoten als in den anderen Szenarien.

Das Szenario der intelligenten Navigation führt zu deutlich besseren Werten: Die Auslastung der Kanten verbessert sich, und die Zahl der Staus wie auch die Zahl der Agenten, die im Stau stehen, verringern sich. Der Verkehrsfluss und Netzeffizienz sind deutlich höher, dies geht aber zu Lasten der Umweltbilanz. Die Emissionen sind leicht höher als im Basisszenario. Neben der Umweltbilanz geht dies aber auch zu Lasten des Modal Split, der sich in Richtung Pkw verschiebt. Es kommt zu einem klassischen Rebound-Effekt. Da die Netzeffizienz sehr hoch ist, haben die Agenten einen hohen Anreiz den Pkw zu nutzen. Die Zufriedenheit der Agenten mit ihren Entscheidungen liegt in diesem Szenario nur noch leicht über der des Basisszenarios.

Ein „dritter Weg“ in der Verkehrssteuerung?

Die Erwartung, dass der koordinierte Modus eine Lösung des Zielkonflikts von Effizienz und Nachhaltigkeit mit sich bringt, konnten wir mithilfe unserer Experimente nicht bestätigen. Der koordinierte Modus, in dem die intelligente Navigation weiterhin mitläuft, zeigt etwas schlechtere Emissionswerte als beim Navigationsszenario, kann also die Erwartung nicht erfüllen, dass auf diese Weise das verkehrs- und umweltpolitische Ziel der Senkung von Emissionen erreicht werden kann. Das Ziel der Umverteilung von Emissionen zur Verminderung lokaler Maxima konnte hingegen erreicht werden. Uns ist es in unseren Simulationsexperimenten nicht gelungen zu zeigen, dass dieser „dritte Weg“ zwischen Staatsdirigismus und ungezügelmtem Marktgeschehen eine plausible, einfache und vor allem praktikable Option darstellt, alle politisch motivierten Ziele zu erreichen. Denn der koordinierte Modus geht mit einer leichten Verschlechterung der Netzeffizienz einher: Die Zahl der überlasteten Kanten und der im Stau stehenden Agenten steigt leicht. Allerdings sind auch diese

Werte deutlich besser als im Basisszenario oder im Fall der starren Routenplanung und liegen nur leicht unter denen der intelligenten Navigation.

Somit bleibt zum Schluss dieser Studie offen, inwiefern eine politisch motivierte Regulierung des Straßenverkehrs auf Akzeptanz in der Gesellschaft, aber auch bei der einzelnen Autofahrer*in stoßen wird, wenn weder deutliche Gewinne für die Umwelt noch klar ersichtliche Vorteile für die einzelne Nutzer*in zu erzielen sind. Hier sind ggf. weitere Studien und Simulationsexperimente erforderlich, um herauszufinden, durch welches Bündel an Maßnahmen sich die gewünschten Lenkungswirkungen – bei gleichzeitiger Akzeptanz in der Bevölkerung – erzielen lassen.

8 Literaturverzeichnis

- ADAC (o. J.): Was ist der StauScanner. ADAC. Online verfügbar unter https://www.adac.de/reise_freizeit/verkehr/stauscanner/, zuletzt geprüft am 19.09.2018.
- ADAC (2016): Welche Daten erzeugt ein modernes Auto? ADAC Untersuchung an vier Fahrzeugen. Online verfügbar unter https://www.adac.de/info-testrat/technik-und-zubehoer/fahrerassistenzsysteme/daten_im_auto/default.aspx, zuletzt geprüft am 05.09.2018.
- Adelt, Fabian; Hoffmann, Sebastian (2017): Der Simulator „SimCo“ als Tool der TA. In: *I 26* (3), S. 37–43. DOI: 10.14512/tatup.26.3.37.
- Adelt, Fabian; Weyer, Johannes; Hoffmann, Sebastian; Ihrig, Andreas (2018): Simulation of the governance of complex systems (SimCo). Basic concepts and initial experiments. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 21 (2). DOI: 10.18564/jasss.3654.
- Baltes, Hannah; Drobek, Sabine; Griesenbrock, Katie; Schönharting, Jörg (2008): Mobilität in der Metropole Ruhr im Vergleich mit anderen Metropolen. In: *Analysen, Leitbild, Konzepte, Maßnahmen. Endbericht Stand August*.
- Becker, Uwe; Schnieder, Eckehard (Hg.) (2007): Verkehrsleittechnik. Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs ; mit 45 Tabellen. Berlin: Springer (VDI).
- Beesch, Simon (2018): Echtzeitgesellschaft. Beschleunigung und Verdichtung sozialer Prozesse. Masterarbeit. Technische Universität Dortmund, Dortmund. Fachgebiet Techniksoziologie.
- Bellman, Richard (1958): Notes on the Theory of Dynamic Programming—Transportation Models. In: *Management Science* 4 (2), S. 191–195. DOI: 10.1287/mnsc.4.2.191.
- Bitkom (2018): Anteil der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2017. Statista - Das Statistik-Portal. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585883/umfrage/anteil-der-smartphone-nutzer-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 25.06.2018.
- BMVI (2014): ASB Anweisung StraßeninformationsBank. Segment: Netzeigenschaften. 2.03. Aufl. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Verkehrstechnik/Publikationen/Regelwerke/V-asb-netzeigenschaften.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- BMVI (2017): Verkehr in Zahlen 2017/18. 45. aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe. Hamburg: DVV Media Group.
- BMVI (2018): Lkw-Maut. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Artikel/StV/Infrastrukturabgabe/lkw-maut.html>, zuletzt geprüft am 19.09.2018.

- Brazil, William; Caulfield, Brian (2013): Does green make a difference: The potential role of smartphone technology in transport behaviour. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 37, S. 93–101. DOI: 10.1016/j.trc.2013.09.016.
- Cepera, Kay; Weyer, Johannes; Konrad, Julius (2019): Vertrauen in mobile Applikationen. Eine empirische Studie. TU Dortmund (Soziologische Arbeitspapiere, 58).
- Christl, Wolfie; Spiekermann, Sarah (2016): Networks of Control. A Report on Corporate Surveillance, Digital Tracking, Big Data & Privacy. Wien: facultas.
- Coleman, James S. (1995): Grundlagen der Sozialtheorie. Handlungen und Handlungssysteme. Band 1. München: Oldenbourg.
- Commerz Finanz (2015): Anteil der Autofahrer, der zur Vorbereitung der Fahrt oder während der Fahrt grundsätzlich oder gelegentlich Anwendungen wie Google Maps, andere interaktive Tools wie GPS oder Online-Navigationsseiten nutzt. Statista - Das Statistik-Portal. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/579214/umfrage/grundsatzliche-nutzung-von-online-navigationsdiensten-in-weltweiten-laendern/>, zuletzt geprüft am 25.06.2018.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numer. Math.* 1 (1), S. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
- Dong, Wei (2011): An overview of in-vehicle route guidance system. In: *Australian Transport Research Forum* 2011.
- Duit, Andreas; Galaz, Victor (2008): Governance and complexity—emerging issues for governance theory. In: *Governance* 21 (3), S. 311–335.
- Epstein, Joshua M.; Axtell, Robert (1996): Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up. Washington, D.C.: Brookings Inst. Press.
- Esser, Hartmut (1993): Soziologie. Allgemeine Grundlagen. 3. Aufl. Frankfurt: Campus-Verl.
- Fink, Robin D. (2014): Vertrauen in autonome Technik. Modellierung und Simulation von Mensch-Maschine-Interaktion in experimentell-soziologischer Perspektive (PhD Dissertation). Dortmund, T. U. Dortmund.
- Fink, Robin D.; Weyer, Johannes (2011): Autonome Technik als Herausforderung der soziologischen Handlungstheorie. In: *Zeitschrift für Soziologie* 40 (2), S. 91–111.
- Geisberger, Eva; Broy, Manfred (2012): agendaCPS. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (1).
- Gerlough, Daniel L.; Huber, Matthew J. (1975): Traffic flow theory. A monograph. Washington, DC: National research council (Transportation research board, Special report 165).

- Gerwin, Tobias (2008): Intelligente Verkehrssteuerung: Telematik-Konzepte. In: Anja J. Lorenz und Johannes Weyer (Hg.): Fahrerassistenzsysteme und intelligente Verkehrssteuerung: soziologische Analysen hoch automatisierter Verkehrssysteme (21), S. 53–66.
- Gilbert, Nigel (2008): Agent-based models. Los Angeles: Sage (07-153).
- Google (2018a): Whitepaper: Geolocation with Google Maps. Accurate global location for any connected device. Online verfügbar unter https://static.googleusercontent.com/media/enterprise.google.com/de//maps/files/geolocation_leaflet.pdf, zuletzt geprüft am 24.09.2018.
- Google (2018b): Whitepaper: Google Maps Directions API. Calculate directions between locations. Online verfügbar unter https://static.googleusercontent.com/media/enterprise.google.com/de//maps/files/directions_api_leaflet.pdf, zuletzt geprüft am 24.09.2018.
- Google (2018c): Whitepaper: Google Roads API. Online verfügbar unter https://static.googleusercontent.com/media/enterprise.google.com/de//maps/files/roads_api_leaflet.pdf, zuletzt geprüft am 24.09.2018.
- Grande, Edgar (2012): Governance-Forschung in der Governance-Falle? –Eine kritische Bestandsaufnahme. In: *Politische Vierteljahresschrift* 53 (4), S. 565–592.
- Grote, Gudela (2009): Die Grenzen der Kontrollierbarkeit komplexer Systeme. In: Johannes Weyer und Ingo Schulz-Schaeffer (Hg.): Management komplexer Systeme. Konzepte für die Bewältigung von Intransparenz, Unsicherheit und Chaos. München: Oldenbourg, S. 149–168.
- Habermas, Jürgen (1981): Theorie des kommunikativen Handelns. Bd. 1. Handlungsrationalität und gesellschaftliche Rationalisierung. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Haight, Frank A. (1963): Mathematical theories of traffic flow. New York: Academic Press (Mathematics in science and engineering, v. 7).
- Halbritter, Günter; Fleischer, Torsten; Kupsch, Christel (2008): Strategien für Verkehrsinnovationen. Umsetzungsbedingungen, Verkehrstelematik, internationale Erfahrungen. Berlin: Edition Sigma (Global zukunftsfähige Entwicklung -- Perspektiven für Deutschland, 14).
- Harrer, Manfred; Gunitzberger, Richard; Baumgartner, Norbert (2018): Das Verkehrsmanagementsystem und die Verkehrsinformationsdienste der ASFINAG. In: Gerd Riegelhuth und Michael Sanck (Hg.): Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen. Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 11–71.
- Hedström, Peter; Swedberg, Richard (1996): Social Mechanisms. In: *Acta Sociologica* 39, S. 281–308.
- Hessen Mobil (2014): Verkehrsmanagement Region Frankfurt RheinMain. Leitfaden zur Anwendung. 2. Auflage. Hg. v. Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement. Wiesbaden.

- Jung, H.; F. Deppe; K. H. Tjaden; M. Tjaden; G. Fülberth; R. Kühnl et al. (1977): BRD - DDR. Vergleich der Gesellschaftssysteme. Köln: Pahl-Rugenstein-Verlag (Kleine Bibliothek).
- Keller, H.; Zackor, H. (2008): Von PROMETHEUS zum Mobilitätsmanagement-zur Geschichte der Verkehrstelematik/From PROMETHEUS to mobility management-to the history of transport telematics. In: *Straßenverkehrstechnik* 52 (7).
- Khoo, Hooi Ling; Asitha, K. S. (2016): An impact analysis of traffic image information system on driver travel choice. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 88, S. 175–194. DOI: 10.1016/j.tra.2016.03.014.
- Kleine-Besten, Thomas; Kersken, Ulrich; Pöchmüller, Werner; Schepers, Heiner; Mlasko, Torsten; Behrens, Ralph; Engelsberg, Andreas (2015): Navigation und Verkehrstelematik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer (Hg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 1047–1079.
- Knorr Cetina, Karin; Preda, Alex (2004): *The sociology of financial markets*: Oxford University Press.
- Koller-Matschke, Irina (2018): Report SOCRATES 2.0. Proposed Cooperation Framework & Bottlenecks.
- Konrad, J.; Cepera, K. (08.08.2018): Experteninterview zur Verkehrssteuerung mit drei Vertretern der BAST. Interview mit Experteninterview BAST. Bergisch Gladbach. Medium: Audiodatei und Transkription.
- Konrad, J.; Cepera, K.; Weyer, J. (18.06.2018): Experteninterview zur Verkehrssteuerung mit einem Vertreter von TomTom (Andreas Erwig). Interview mit Experteninterview TomTom. Ort: TU Dortmund. Medium: Audiodatei und Transkription.
- Kooiman, Jan; Bavinck, Maarten; Chuenpagdee, Ratana; Mahon, Robin; Pullin, Roger (2008): Interactive governance and governability. an introduction. In: *Journal of Transdisciplinary environmental studies* 7, S. 1–11.
- Kopetz, Hermann (2011): *Real-Time Systems*. Boston, MA: Springer US.
- Krampe, Stefan; Trupat, Stefan; Wahle, Joachim (2014): Qualitätsbewertung von FC-Daten zur Verkehrslageermittlung in Niedersachsen. In: Josef Strobl, Thomas Blaschke, Gerald Griesebner und Bernhard Zagel (Hg.): *Angewandte Geoinformatik 2014. Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg ; [AGIT 2014 - Geospatial innovation for society ; vom 2. bis. 4 Juli 2014*. Berlin: Wichmann, S. 495–504.
- Krause, Jens; Ruxton, Graeme D.; Krause, Stefan (2009): Swarm intelligence in animals and humans. In: *Trends in Ecology & Evolution* 25 (1), S. 28–34. DOI: 10.1016/j.tree.2009.06.016.

- 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.
- Krusch, Christian (2008): Mikroökonomie in künstlichen Gesellschaften. Vom Sugarscape zum Ruhrmodell. Münster: LIT.
- Loorbach, Derk (2007): Transition Management. New mode of governance for sustainable development. Utrecht: International Books.
- Luhmann, Niklas (1997): Die Gesellschaft der Gesellschaft. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Manzey, Dietrich (2008): Systemgestaltung und Automatisierung. In: Petra Badke-Schaub et al. (Hg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Heidelberg: Springer, S. 307–324.
- Mayntz, Renate; Scharpf, Fritz W. (Hg.) (1995): Gesellschaftliche Selbstregulierung und politische Steuerung. Frankfurt/M.: Campus.
- Meißner, Andreas (2014): Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten der Dortmunder Bevölkerung 2013. Stadt Dortmund. Online verfügbar unter https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/planen_bauen_wohnen/stadtplanungs_und_bauordnungsamt/stadtplanung/verkehrsplanung/gesamtstaedtische_verkehrsplanung/haushaltsbefragung_mobi/index.html, zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Nadi, Saeed; Delavar, Mahmoud Reza (2010): Location-based service for In-vehicle route guidance with real time traffic information. The 12th World Conference on Transport Research, 2010.
- Nagel, Kai; Schreckenberg, Michael (1992): A cellular automaton model for freeway traffic. In: *J. Phys. I France* 2 (12), S. 2221–2229. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
- Neukirchner, Ernst-Peter (2010): Fahrzeugnavigation. In: Konrad Reif (Hg.): Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Bosch-Fachinformation Automobil), S. 192–203.
- Perrow, Charles (1987): Normale Katastrophen. In: *Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*. Frankfurt/M.: Campus.
- Petersen, Rudolf; Reinert, Sandra (2018): Mobilität für morgen. In: Oliver Schwedes (Hg.): Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung. 2. Auflage 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer VS, S. 467–489.
- Pfliegl, R. (2011): Technologietrends im Verkehrssystem – Potentiale für eine integrierte Verkehrssteuerung. In: *Elektrotech. Inftech.* 128 (7-8), S. 265–270. DOI: 10.1007/s00502-011-0019-3.
- Resnick, Michael (1995): Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Microworlds (Complex Adaptive Systems). Cambridge/Mass.: MIT Press.

- Richter, Felix (2017): Big Data on Wheels [ONLINE]. Statista - Das Statistik-Portal. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/chart/8018/connected-car-data-generation/>, zuletzt geprüft am 17.09.2018.
- Ritz, Johannes (2018): Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Rochlin, Gene I. (1997): Trapped in the net. The unanticipated consequences of computerization. Princeton: Princeton UP.
- Rosa, Hartmut (2005): Beschleunigung. Die Veränderung der Zeitstrukturen in der Moderne. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Ruiner, Caroline; Wilkesmann, Maximiliane (2016): Arbeits- und Industriosozologie. Paderborn: Wilhelm Fink (Soziologie im 21. Jahrhundert, 4652).
- Russell, Matthew A. (2013): Mining the Social Web. Data Mining Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, GitHub, and More (2nd Edition): O'Reilly Media, Inc.
- Schelewsky, Marc; Jonuschat, Helga; Bock, Benno; Stephan, Korinna (2014): Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schimank, Uwe (2010): Handeln und Strukturen. Einführung in eine akteurtheoretische Soziologie (4. Aufl.). München: Juventa.
- Schreckenberger, M. (2007): Neue Perspektiven des Verkehrsmanagements. In: *Elektrotech. Inftech.* 124 (4), S. 90–95. DOI: 10.1007/s00502-007-0428-5.
- Schultze, Rainer-Olaf (2013): Governance – ein neues Regime? In: *Zeitschrift für Parlamentsfragen* (44), S. 659–674.
- Schwedes, Oliver; Canzler, Weert; Knie, Andreas (Hg.) (2016): Handbuch Verkehrspolitik. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer VS (Springer Nachschlagewissen).
- Semanjnski, Ivana; Gautama, Sidharta; Ahas, Rein; Witlox, Frank (2017): Spatial context mining approach for transport mode recognition from mobile sensed big data. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 66, S. 38–52. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.07.004.
- Siemens AG (2017): Das Magazin für intelligente Straßenverkehrstechnik. Hg. v. Siemens AG - Mobility Division - Mobility Management. München (41).
- Socrates 2.0 (2018): Factsheet: Cooperation Framework for Interactive Traffic Management.
- Statistisches Bundesamt (destatis) (2017): Statistisches Jahrbuch Deutschland 2017. 1., Auflage. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Svennerberg, Gabriel (2010): Beginning Google Maps API 3: Apress.
- Teigelkamp, Theresia (2015): Verkehrsmittelwahl als Thema der soziologischen Handlungstheorie. Eine empirische Studie (Bachelorarbeit TU Dortmund).

- Teunissen, Peter J. G.; Montenbruck, Oliver (Hg.) (2017): Springer handbook of global navigation satellite systems. Cham: Springer International Publishing (Springer handbooks).
- TomTom (2009): White paper: How TomTom's HD Traffic™ and IQ Routes™ data provides the very best routing. Travel Time Measurements using GSM and GPS Probe Data. Online verfügbar unter www.tomtom.com/lib/doc/download/HDT_White_Paper.pdf, zuletzt geprüft am 13.06.2017.
- TomTom (2010): TomTom Manifest. Hintergrundpapier. Online verfügbar unter https://www.tomtom.com/landing_pages/trafficmanifesto/content/pdf/Support%20Document_lid3.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2018.
- TomTom (2015): White Paper: TomTom Real Time Traffic Information. Online verfügbar unter https://www.tomtom.com/lib/img/REAL_TIME_TRAFFIC_WHITEPAPER.pdf, zuletzt geprüft am 13.06.2017.
- TomTom (2018a): Die Geschichte der Telematik - ein kurzer Überblick. Online verfügbar unter https://telematics.tomtom.com/de_de/webfleet/landing-pages/history-of-telematics/, zuletzt geprüft am 17.09.2018.
- TomTom (2018b): Informationen zu IQ Routes. Online verfügbar unter http://de.support.tomtom.com/app/answers/detail/a_id/9591/~/informationen-zu-iq-routes, zuletzt geprüft am 23.09.2018.
- Tseng, Yin-Yen; Knockaert, Jasper; Verhoef, Erik T. (2013): A revealed-preference study of behavioural impacts of real-time traffic information. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 30, S. 196–209. DOI: 10.1016/j.trc.2011.11.006.
- Tversky, Amos; Kahnemann, David (1981): A Framing of Decisions and the Psychology of Choice. In: *Science* 211 (30 January 1981), S. 453–458.
- van Dam, Koen H.; Nikolic, Igor; Lukszo, Zofia (Hg.) (2013): Agent-Based Modelling of Socio-Technical Systems: Springer (Dordrecht).
- Weber, Daniel; Chrobok, Roland; Hafstein, Sigurdur; Mazur, Florian; Pottmeier, Andreas; Schreckenberger, Michael (2006): OLSIM: Inter-urban Traffic Information. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): *Innovative Internet Community Systems*, Bd. 3473. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science, 3473), S. 296–306.
- Weyer, Johannes (2008): Mixed Governance - Das Zusammenspiel von menschlichen Entscheidern und autonomer Technik im Luftverkehr der Zukunft. In: Ingo Matuschek (Hg.): *Luft-Schichten. Arbeit, Organisation und Technik im Luftverkehr*. Berlin: Edition Sigma, S. 188–208.
- Weyer, Johannes (2014): Einleitung. Netzwerke in der mobilen Echtzeitgesellschaft. In: Johannes Weyer (Hg.): *Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung* (3. Aufl.). München: Oldenbourg, S. 3–37.

- Weyer, Johannes (2016): Confidence in hybrid collaboration. An empirical investigation of pilots' attitudes towards advanced automated aircraft. In: *Safety Science* 89, S. 167–179.
- Weyer, Johannes (2019): Die Echtzeitgesellschaft. Wie smarte Technik unser Leben steuert? Frankfurt/M.: Campus.
- Weyer, Johannes; Adelt, Fabian; Hoffmann, Sebastian (2015): Governance of complex systems. A multi-level model. TU Dortmund (Soziologische Arbeitspapiere, 42). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/2003/34132>.
- Weyer, Johannes; Adelt, Fabian; Konrad, Julius; Hoffmann, Sebastian (2018a): Agentenbasierte Simulation sozio-technischer Systeme mit dem Simulator SimCo. In: Jürgen Beyerer und Petra Winzer (Hg.): Beiträge zu einer Systemtheorie Sicherheit. München: Herbert Utz Verlag (acatech Diskussion), S. 168–176.
- Weyer, Johannes; Delisle, Marc; Kappler, Karolin; Kiehl, Marcel; Merz, Christina; Schrape, Jan-Felix (2018b): Big Data in soziologischer Perspektive. In: Barbara Kolany-Raiser, Reinhard Heil, Carsten Orwat und Thomas Hoeren (Hg.): Big Data und Gesellschaft. Eine multidisziplinäre Annäherung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Technikzukünfte, Wissenschaft und Gesellschaft / Futures of Technology, Science and Society), S. 69–149.
- Wilensky, Uri (1999): NetLogo. Northwestern University, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Evanston, IL. Online verfügbar unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Willke, Helmut (1989): Systemtheorie entwickelter Gesellschaften. Dynamik und Riskanz moderner gesellschaftlicher Selbstorganisation. Weinheim: Juventa.
- Willke, Helmut (2007): Smart Governance. Governing the Global Knowledge Society. Frankfurt/M.: Campus.