

CLIMATE CHANGE

41/2023

Teilbericht

Qualitative und quantitative Modellierungen der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten

Möglichkeiten und Grenzen der Übertragbarkeit auf das Feld der Anpassung an den Klimawandel

von:

Christoph Schünemann, Anastasiia Sidorova, Hendrik Herold

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.
Weberplatz 1, 01217 Dresden

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 41/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 48 104 0
FB001092

Teilbericht

Qualitative und quantitative Modellierungen der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten

Möglichkeiten und Grenzen der Übertragbarkeit auf das
Feld der Anpassung an den Klimawandel

von

Christoph Schünemann, Anastasiia Sidorova, Hendrik Herold

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.
Weberplatz 1, 01217 Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.
Weberplatz 1
01217 Dresden

Abschlussdatum:

Dezember 2022

Redaktion:

Fachgebiet I 1.6
Dr. Thomas Abeling

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2023, überarbeitete Fassung vom Oktober 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Qualitative und quantitative Modellierungen der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten - Möglichkeiten und Grenzen für die Übertragbarkeit auf das Feld der Anpassung an den Klimawandel

Die vorliegende Studie stellt die Ergebnisse einer ausgiebigen Recherche qualitativer und quantitativer Modellierungsansätze zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten dar. Neben der Recherche möglicher Modellierungsansätze, zielt die Studie darauf ab, die Möglichkeiten und Grenzen der Übertragung der gefundenen Ansätze auf das Politikfeld der Klimawandelanpassung zu prüfen. Die Studie gliedert sich dabei nach der Einführung in das Themenfeld der Politikmodellierung auf folgende Inhalte:

1. Einführung in das Feld der Politikmodellierung und Verhaltensmodellierung sowie Erläuterung zur Methodik der Modellierungsrecherche
2. Vorstellung von Beispielen qualitativer und quantitativer Modellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten aus verschiedenen Anwendungsfeldern in der Politikberatung und dem Feld der Klimawandelanpassung (Kapitel 2),
3. Kurze Vorstellung und Erläuterung der recherchierten qualitativen (Systemdenken, Konzeptkarten, Kausaldiagramme), semi-quantitativen (*Fuzzy Cognitive Mapping*, soziale Netzwerkanalyse, Szenarienentwicklung, entscheidungsorientierte Modellierung) und der quantitativen (System Dynamics, agentenbasierte Modellierung, zelluläre Automaten, empirische Modellierung und Bayessche Netze) (Basis-)Modellierungsmethoden (Kapitel 3),
4. Aufzeigen der Chancen und Limitierungen von Modellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten in der Politikberatung (Kapitel 4) und
5. Diskussion der Übertragbarkeit der gefundenen qualitativen bis quantitativen Modellierungsansätzen auf das Politikfeld der Anpassung an den Klimawandel (Kapitel 5).

Die wesentlichsten Erkenntnisse der Studie sind in der Zusammenfassung aufgeführt.

Abstract: Qualitative and quantitative modelling of the efficacy of policy instruments - opportunities and limitations for applicability to the field of climate change adaptation.

This study presents the results of a comprehensive research of qualitative and quantitative modelling approaches to analyse the efficacy of policy instruments. In addition to reviewing existing modelling approaches, this study addresses the opportunities and limitations of applying the findings to the policy field of climate change adaptation. Starting with an introduction to the field of policy modelling, the study is structured as follows:

1. Introduction to the field of policy and behavioural modelling and explanation of the research methodology
2. Examples of qualitative and quantitative modelling for the analysis of the efficacy of policy instruments in the fields of policy advice and the climate change adaptation (Chapter 2),
3. Introduction and overview of the reviewed qualitative (Systems Thinking, Concept Mapping, Causal Loop Diagrams), semi-quantitative (Fuzzy Cognitive Mapping, Social Network Analysis, Scenario Analysis, Decision-oriented Modelling) and quantitative (System Dynamics, Agent-based modelling, Cellular Automata, Empirical Modelling and Bayesian Networks) core modelling methods (Chapter 3),
4. Identifying the opportunities and limitations of modelling for policy instruments' efficacy analysis in the field of policy advice (Chapter 4); and
5. Discussion of the applicability of the identified qualitative and quantitative modelling approaches to the policy field of climate change adaptation (Chapter 5).

The most important findings of the study are outlined in the summary.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	12
Summary	16
1 Einführung	19
1.1 Wirksamkeitsbewertung.....	20
1.2 Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten.....	21
1.3 Politikmodellierung.....	22
1.4 Verhaltensmodellierung	24
1.5 Methodik der Modellierungsrecherche.....	25
2 Anwendungsbeispiele der Modellierung zur Einschätzung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten und -maßnahmen	28
2.1 Beispiele aus der Praxis der Politikberatung.....	28
2.1.1 Klimaschutz	29
2.1.2 Verkehr	29
2.1.3 Energie	31
2.1.4 Wassermanagement	33
2.1.5 Finanzpolitik.....	34
2.1.6 Stadtplanung.....	34
2.1.7 Epidemiologie	35
2.3 Beispiele im Themenfeld Klimawandelanpassung aus der Wissenschaft.....	36
2.4 Fazit	39
3 Modellierungsmethoden zur Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten.....	42
3.1 Qualitative, semi-quantitative oder quantitative Modellierung.....	42
3.2 Keine einheitliche Taxonomie der Methoden	43
3.3 Beschreibung der Methoden	44
3.3.1 Qualitative Modellierungsmethoden.....	44
3.3.1.1 Systemdenken (System Thinking).....	45
3.3.1.2 Konzeptkarte (Concept Mapping).....	45
3.3.1.3 Kausaldiagramm (Causal Loop Diagram)	47
3.3.2 Semi-quantitative Modellierung.....	48
3.3.2.1 Fuzzy Cognitive Mapping (FCM)	48

3.3.2.2	Soziale Netzwerkanalyse (<i>Social Network Analysis</i>)	50
3.3.2.3	Szenarienentwicklung	51
3.3.2.4	Entscheidungsorientierte Modellierung (<i>Decision-focused structuring</i>)	52
3.3.3	Quantitative Modellierung	53
3.3.3.1	System Dynamics	54
3.3.3.2	Agentenbasierte Modellierung	55
3.3.3.3	Zelluläre Automaten (<i>Cellular Automata</i>)	57
3.3.3.4	Bayessche Netze (<i>Bayesian Networks, Belief networks</i>)	58
3.3.3.5	Empirische Modellierung (<i>auf Basis von Maschinellern/Künstlicher Intelligenz</i>)	59
3.3.4	Hybride Modellierung (<i>Hybrid Modeling</i>)	61
3.4	Verhaltensmodellierung: Abbildung der sozialen Dimension	63
3.5	Fazit	66
4	Chancen und Limitierungen von Politikmodellierung mit Akteursbezug	68
4.1	Chancen	68
4.2	Limitierungen	70
5	Übertragbarkeit auf das Themenfeld der Anpassung an den Klimawandel	74
6	Quellenverzeichnis	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten.....	20
Abbildung 2:	Klassifizierung von Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten nach deren Komplexität	21
Abbildung 3:	Modellierung in Politikberatung.....	22
Abbildung 4:	Modellierungen im Politikzyklus (Policy Cycle) mit Einbindung qualitativer und quantitativer Modellierung	23
Abbildung 5:	Vereinfachte schematische Darstellung der Bereiche und Ansätze der Politikmodellierung mit Hervorheben der Modellierungsmethoden, welche die Wirksamkeit von Politikinstrumenten in komplexen Systemen analysieren können.....	26
Abbildung 6:	Screenshot des Online-Politiksimulator EN-ROADS	29
Abbildung 7:	Fuzzy Cognitive Modell des Verkehrssystem im Forschungsvorhaben Mobile (Stadt Norderstedt)	30
Abbildung 8:	Beispiel für ein Kausaldiagramm, eingebunden in ein umfassenderes Modell (PTTMAM).....	31
Abbildung 9:	Screenshot des MacKay Online-Kohlenstoffrechners	32
Abbildung 10:	Bildausschnitt aus dem <i>Serious Game Participatory Chinatown</i>	34
Abbildung 11:	Schema der Verhaltensmodellierung nach Acosta-Michlik und Espaldon (2008).....	39
Abbildung 12:	Abgrenzung zwischen qualitativen und quantitativen Phasen der Modellentwicklung für die Politikberatung.....	42
Abbildung 13:	Visuelle Darstellung der Methode: Konzeptkarte (Concept Mapping)	46
Abbildung 14:	Visuelle Darstellung der Methode: Kausaldiagramm (Causal Loop Diagram)....	47
Abbildung 15:	Visuelle Darstellung der Methode: Fuzzy Cognitive Mapping (FCM).....	49
Abbildung 16:	Visuelle Darstellung der Methode: Soziale Netzwerkanalyse	50
Abbildung 17:	Visuelle Darstellung der Methode: Szenarienentwicklung	51
Abbildung 18:	Szenariomodellierung in Abhängigkeit von der Phase des politischen Zyklus...	52
Abbildung 19:	Visuelle Darstellung der Methode: Entscheidungsorientierte Modellierung	53
Abbildung 20:	Visuelle Darstellung der Methode: System Dynamics (nach Schünemann 2021).....	55
Abbildung 21:	Visuelle Darstellung der Methode: Agentenbasierte Modellierung	56
Abbildung 22:	Visuelle Darstellung der Methode: Zelluläre Automaten (Cellular Automata)..	57
Abbildung 23:	Visuelle Darstellung der Methode: Bayessche Netze.....	58
Abbildung 24:	Visuelle Darstellung der Methode: Empirische Modellierung	60
Abbildung 25:	Visuelle Darstellung der Methode: Hybride Modellierung	62
Abbildung 26:	Stufen der Modellakzeptanz	70
Abbildung 27:	Überblick über die qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Modellierungsmethoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten mit Zuordnung, ob es sich eher um eine qualitative oder quantitative Modellierungsmethode handelt und diese Phänomene detailliert oder aggregiert betrachtet	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich ausgewählter Theorien zur Verhaltensmodellierung (nach Schrieks 2021).....	65
------------	--------------------------------------------------------------------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

ABM	Agentenbasierte Modellierung
AI	Artifizielle Intelligenz / Artificial Intelligence
AIT	Austrian Institute of Technology
BAU	Business-As-Usual
BBN	Bayesian Belief Networks
BI	Behavioural Insights
BN	Bayes'sches Netzwerk
CA	Zelluläre Automaten / Cellular Automata
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs
DES	Ereignisdiskrete Simulation
DL	Deep Learning
EEA	Europäische Umweltagentur / European Environment Agency
EM	Empirische Modellierung
EU	Europäische Union
EUT	Expected Utility Theory / Theorie des erwarteten Nutzens
FCM	Fuzzy Cognitive Mapping
IAM	Integrated Assessment Modell
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
IT	Informationstechnologie
KI	Künstliche Intelligenz
MCDA	Multiply Criteria Decision Analysis
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PMT	Prospect Theory / Prospect-Theorie
PTTMAM	Powertrain Technology Transition Market Agent Model
SD	System Dynamics
SNA	Soziale Netzwerkanalyse/Social Network Analysis
TPB	Theory of Planned Behaviour/Theorie des geplanten Verhaltens
UK	Vereinigtes Königreich/United Kingdom
USA	Die Vereinigten Staaten von Amerika/United States of America
XAI	Explainable Artificial Intelligence

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt auf, welche Modellierungsansätze geeignet sind, um vor allem im Politikfeld der Klimaanpassung Politikinstrumente vor ihrer Einführung einer Ex-ante-Wirksamkeitsanalyse zu unterziehen bzw. deren Lenkungswirkung zu prüfen. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse, ob Politikinstrumente die Dynamik eines Prozesses bzw. Systems in der intendierten Weise verändern, wie es vorgesehen ist, unter Berücksichtigung des Akteursverhaltens auf diese Dynamik. Die dementsprechend in dieser Studie berücksichtigten Modellierungsansätze beinhalten daher immer auch sozialwissenschaftliche Komponenten. Entsprechend wurde das umfassende Feld der rein disziplinären, realitätsgetreuen Modellierung, wie sie bei rein naturwissenschaftlichen oder ökonomischen Modellen üblich ist, hier nicht betrachtet. Der Fokus der Recherche lag vielmehr auf Ansätzen der interdisziplinären Modellierung komplexer adaptiver Systeme (u. a. sozio-ökologische Systeme, gekoppelte Mensch-Natur-Systeme), der stochastischen Modellierung und der datengetriebenen-empirischen Modellierung. Diese Ansätze können – müssen aber nicht zwingend – verschiedene Ansätze der Verhaltensmodellierung berücksichtigen, aufbauen auf Ad-Hoc-Annahmen oder Verhaltenstheorien.

Bei der Darstellung der Modellierungsmethoden berücksichtigen wir dabei qualitative bis hin zu quantitative Modellierungsansätze. Qualitative Ansätze im Bereich der konzeptuellen Modellierung haben ihren Fokus auf der (qualitativen) Abbildung der Systemstruktur bzw. des Systemverhaltens ohne Quantifizierung der Variablen und deren Zusammenhänge. Quantitative Ansätze hingegen stellen eine Erweiterung dar und bilden entweder das dynamische Verhalten des Systems bzw. Prozesses durch Simulationen ab oder führen stochastische Analysen eines Systems zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten durch. Hierfür muss das Modell mit Daten quantifiziert worden sein.

Die Recherche von Beispielen für die Anwendung solcher Modellierungsmethoden im Prozess der Politikberatung im Kapitel 2 verdeutlicht, dass diese schon in einem breiten Spektrum von Anwendungsfeldern (Klimaschutz, Verkehr, Energie, Wassermanagement, Finanzpolitik, Stadtplanung, oder Epidemiologie) genutzt werden. Generell scheint die Politikmodellierung bisher allerdings nur in sehr beschränktem Umfang als zusätzliches Element der Politikgestaltung genutzt worden zu sein. Für die Beispielrecherche war eine klassische akademische Recherche (mit Suche in Forschungsdatenbanken) nicht zielführend, da ein großer Anteil nur in "grauer" Literatur (d. h. Informationen aus nicht-akademischen Zeitschriften und Berichten - z. B. Angaben von Regierungen und Regierungsorganisationen) gefunden wurde. Zudem ist fraglich, ob Modellierungsvorhaben innerhalb der Politikberatung immer öffentlich gemacht werden und somit auch auffindbar waren. Die Recherche zeigt auch auf, dass diese Methoden bisher vor allem in der EU, den USA, Großbritannien und Australien genutzt worden. In Deutschland hingegen konnten wir in unserer Recherche nur vereinzelte Anwendungen dieser Art von Modellierungen finden.

Neben dieser breit gefassten Recherche zur Anwendung von Modellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Instrumenten in der Praxis der Politikberatung wurde eine zweite Beispielrecherche im spezifischeren Themenfeld der Anpassung an den Klimawandel durchgeführt. Da zu diesem Politikfeld kaum etwas in der Praxis der Politikberatung gefunden wurde, ist hierfür eine Recherche wissenschaftlicher Veröffentlichungen in Forschungsdatenbanken durchgeführt worden. Dabei ist deutlich geworden, dass v. a. Systembetrachtungen und der Einfluss von politischen Vorgaben untersucht wurden. Äußerst selten lag der Fokus auf der expliziten Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten als primäres Ziel. Zudem war bei

den meisten akademischen Studien nicht erkennbar, ob die Erkenntnisse in den Prozess der Politikberatung eingebettet wurden.

Die in den vorgestellten Beispielen genutzten grundlegenden (Basis-)Modellierungsmethoden sind überblicksartig in Kapitel 3 dargestellt und aufgeteilt nach

- a) qualitativen, eher konzeptuellen Methoden und Ansätzen, wie das Systemdenken, Konzeptkarten und Kausaldiagramme (CLD),
- b) semi-quantitativen Methoden, in denen Modelle meist stark vereinfacht quantifiziert werden, wie Fuzzy Cognitive Mapping (FCM), Soziale Netzwerkanalyse (SNA), Szenarienentwicklung oder Entscheidungsorientierte Modellierung und
- c) quantitativen Methoden, was System Dynamics (SD), Agentenbasierte Modellierung (ABM), Zelluläre Automaten (CA), Empirische Modellierung (EM) und Bayessche Netze (BN) enthält.

Dabei wird die Methode kurz erläutert und deren Anwendungsgebiete, notwendige Eingaben und Limitierungen vorgestellt. Ein Vergleich der Methoden zeigt auf, dass die Auswahl geeigneter Methoden zentral von der Problemstellung abhängt. Daher ist es wesentlich, vor Wahl der Modellierungsmethode(n) die Problemstellung zu schärfen. Dies kann durch eine eher konzeptuelle Analyse der Systemstruktur bzw. des Systemverhaltens durch qualitative Modellierungsmethoden geschehen, wie sie beim Ansatz des Systemdenkens üblich ist. Darauf aufbauend kann das problematische Verhalten des Prozesses/Systems, in dem die Wirkung des Politikinstrumentes untersucht werden soll, durch dynamische Simulationen der quantitativen Modellierungsmethoden tiefer analysiert werden. Hier stellt sich dann die Frage ob dies aggregiert mit System Dynamics oder detailliert mit agentenbasierter Modellierung geschehen soll. Ein Schwerpunkt im Methodenkapitel bildet bei der Fragestellung der Lenkungswirkung von Instrumenten das Feld der Verhaltensmodellierung, das erläutert, welche Ansätze geeignet sind, um das Verhalten von Akteuren oder Akteursgruppen sowie deren Beeinflussung abzubilden. Dies reicht von Ad-Hoc-Ansätzen über statistische Analysen sowie Verhaltenstheorien bis hin zu künstlicher Intelligenz (KI).

Die Betrachtung von Chancen und Limitierungen (Kapitel 4) der vorgestellten Modellierungsansätze zur Abbildung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten in komplexen sozialen Fragestellungen verdeutlicht, dass solche Modelle eine Bereicherung der Entscheidungsunterstützung im Feld der Politikberatung darstellen können. Sie können andere Tools der Politikberatung ergänzen und zeigen auf, welche Effekte eine Entscheidung oder ein Politikinstrument auf das Akteursverhalten und die Dynamik des komplexen Problems bzw. Prozesses (bspw. Kippunkte oder nicht-intendierte Nebeneffekte) haben kann. Wichtig ist anzumerken, dass es sich bei der in diesem Bericht betrachteten Art von Modellierungen meist nicht um direkte Prognosemodelle handelt, die explizit vorhersagen, wie sich die Dynamik in Zukunft verhält. Vielmehr verdeutlichen sie, welche Zusammenhänge im System bestehen und was eine Änderung bzw. Störungen im System für Auswirkungen auf die nicht-lineare Dynamik und Verhalten haben kann. Dies ist der Komplexität der Systeme geschuldet, in dem die Politikinstrumente wirken. Hier werden auch nur Projektionen durchgeführt („unter den Annahmen kann Folgendes passieren...“) und keine Prognosen, da die Einflüsse zu komplex sind, um gezielte Vorhersagen zu treffen (z. B., dass das Politikinstrument im Jahr 2035 dafür sorgt, dass 50 % der Akteure die beabsichtigte Maßnahme umsetzen).

Ein großer Unsicherheitsfaktor bei quantitativen Modellen sind die benötigten Daten und deren Qualität, welche üblicherweise das menschliche Verhalten mitberücksichtigen. Die Datenbeschaffung und -verarbeitung kann mit der Quantifizierung des Modells evtl. zu lange dauern, um für den politischen Entscheidungsprozess noch relevante Erkenntnisse einfließen zu

lassen. Dies ist bei qualitativen Modellen, die vor allem die Systemstruktur und das damit einhergehende Systemverhalten betrachten, nicht der Fall. Diese können vergleichsweise schnell erstellt werden, können das Verhalten des Systems jedoch nur qualitativ wiedergeben. Zudem sind solche Modelle zu einem bestimmten Anteil per se subjektiv, da sie auf das begrenzte Systemverständnis (mentale Modelle) der Modellierer_innen und der Beteiligten aufbauen. Dies kann durch den Ansatz der partizipativen Modellierung reduziert werden, indem relevante Stakeholder bzw. Akteure mit ihrem diversen Systemverständnis in den Modellierungsprozess mit eingebunden werden. Dies hat neben einer vollständigeren, umfassenderen Systembeschreibung noch weitere Vorteile, wie z. B. die bessere Identifikation mit dem Modell, die evtl. in erhöhte Glaubwürdigkeit der Modellierungserkenntnisse mündet, und somit einer besseren Nutzung des Modells innerhalb der Politikberatung.

Der bedeutendste Vorteil sowohl von qualitativen als auch von quantitativen Modellierungsansätzen zur Abbildung komplexer Systeme ist jedoch, dass die vorherrschende und das Problem stark vereinfachende lineare Denkweise durch nicht-lineare Betrachtungen und damit verbundene nicht-lineare Dynamiken des Systems ersetzt werden. Dies ist insofern relevant, da komplexe Systeme und Probleme sowie die Wirkung von Politikinstrumenten in diesen sich meist nicht auf lineare Ursache-Wirkung Ansätze reduzieren können. Da letztere teilweise eine unzureichende Vereinfachung der Abbildung der Problematik beschreiben, resultieren diese Entscheidungsprozesse evtl. in fehlerhaften Handlungsoptionen. Diese Problematik wird mit Hilfe der Modellierungen komplexer Systeme, allen voran mit den Methoden System Dynamics und agentenbasierter Modellierung, versucht zu lösen, die das nicht-lineare Verhalten berücksichtigen. Trotz dieser Vorteile wird diese Art der Modellierung noch nicht systematisch in der Politikmodellierung genutzt. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und reichen von mangelndem Verständnis des Modells und damit einhergehender geringer Glaubwürdigkeit bis hin zur Ressourcen- und Expertisefrage.

Im letzten Kapitel wird die Übertragbarkeit von qualitativen und quantitativen Modellierungsansätzen auf das Politikfeld der Anpassung an den Klimawandel diskutiert. Dabei wird genauer auf die Fragestellung eingegangen, welche Modellierungsmethoden und -ansätze sich besonders für die Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten der Klimawandelanpassung eignen. Neben der Fragestellung welches Problem genau modelliert werden soll, hängt dies unserer Einschätzung nach stark davon ab, in welcher Entwicklungsphase sich das zu prüfende Politikinstrument befindet.

In der frühen, konzeptionellen Phase scheinen eher qualitative Modellierungs- und Konzeptualisierungsmethoden hilfreich, vor allem aus dem weiten Bereich des Systemdenkens. Im weiteren Entwicklungsprozess erfolgt dann die weitere Ausdifferenzierung des Politikinstrumentes. Zur Beantwortung der damit einhergehenden Fragen innerhalb dieser detaillierteren Ausarbeitungsphase von Politikinstrumenten eignen sich vor allem quantitative Modellierungsmethoden, welche Auswirkungen des Politikinstrumentes auf die Systemdynamik aufzeigen und die Akteursperspektiven berücksichtigen. Dazu gehören System Dynamics, agentenbasierte Modellierung, zelluläre Automaten oder die empirische Modellierung. Diese Unterteilung gilt natürlich nicht nur im Bereich der Klimaanpassung, sondern generell für Entwicklungsprozesse von Politikinstrumenten.

Im zweiten Schritt der Prüfung der Übertragbarkeit der Ansätze auf das Feld der Klimawandelanpassung wurde die Anwendung jeder vorgestellten Modellierungsmethode am beispielhaften Thema der Reduktion der Hitzebelastung durch vermehrte urbane Begrünung vorgestellt. Dabei zeigt sich, wie groß das Spektrum an Fragestellungen ist, dass diese qualitativen und quantitativen Modellierungsansätze adressieren können. Dies und die anderen Erkenntnisse dieser Recherchearbeit unterstreichen das Potenzial der Modellierungsansätze zur Analyse von

Wirksamkeiten von Entscheidungen und Politikinstrumenten für die Nutzung im Prozess der Politikberatung.

Summary

This study identifies which modelling approaches are suitable for the ex-ante efficacy analysis of policy instruments focusing the field of climate change adaptation prior to their potential implementation. It focuses on the analysis of the extent to which policy instruments influence the dynamics of a process or system in the way they were intended to, considering the behaviour of actors. The modelling approaches included in this study therefore contain social science components. Therefore, the comprehensive field of purely disciplinary, reality-based modelling, as is common in natural science or economic models, has not been considered here. The research rather focused on approaches of interdisciplinary modelling of complex adaptive systems (among others - socio-ecological systems, coupled human-natural systems), stochastic modelling and data-driven empirical modelling. These approaches can - but do not necessarily have to - take into account different behavioural modelling paradigms, based on ad hoc assumptions or behavioural theories.

When describing the modelling methods, we consider a range of approaches from qualitative to quantitative ones. Qualitative approaches used in conceptual modelling focus on the (qualitative) representation of the system structure or system behaviour without quantifying the variables and their interrelationships. Quantitative approaches, on the other hand, provide an extended perspective and either simulate the dynamic behaviour of a system or perform stochastic analyses of a system to determine probabilities of event occurrence. For this purpose, the model must be quantified with data.

The review of use cases of such modelling methods in the policy making in chapter 2 indicates that such methods are already used in a wide range of application fields (climate change mitigation, transport, energy, water management, fiscal policy, urban planning or epidemiology). In general, however, policy modelling seems to have been used so far only to a very limited extent - as an additional element of policy making. Conventional academic research (in scientific databases) was not successful for the case study identification and analysis, as a large proportion was only found in "grey" literature (i.e. information from non-academic reports and publications - e.g. information from governments and governmental organisations). Furthermore, there is an issue that modelling projects within policy advice are not always made public and therefore cannot always be found in the open access. The research also revealed that so far these methods have mainly been used in the EU, the USA, Great Britain and Australia. In Germany, on the other hand, we were only able to find some isolated applications of this type of modelling.

In addition to this general research on the use of modelling methods to analyse the efficacy of policy instruments in policy advice practice, a second exemplary research was carried out in the more specific topic area of climate change adaptation. Since hardly anything related to this policy field was found in the practice of policy advice, a review of scientific publications in research databases was conducted on this topic. This revealed that primarily systemic considerations and the influence of political guidelines were examined. The focus on explicit analysis of the efficacy of policy instruments was very rarely the primary objective. Moreover, in most academic studies it was not clear whether the findings were embedded in the process of policy advice.

The fundamental (basic) modelling methods used in the described cases are presented in chapter 3 and divided into

- a) qualitative, rather conceptual methods and approaches, such as systems thinking, concept mapping and causal diagrams (CLD),

- b) semi-quantitative methods, which usually quantify models in a highly simplified way, such as fuzzy cognitive mapping (FCM), social network analysis (SNA), scenario development or decision-oriented modelling, and
- c) quantitative methods, which include System Dynamics (SD), Agent-Based Modelling (ABM), Cellular Automata (CA), Empirical Modelling (EM) and Bayesian Networks (BN).

The methods and their fields of application, required inputs and limitations are briefly explained. A comparison of the various methods shows that the choice of the most suitable method depends on the problem. Therefore, it is essential to sharpen the problem definition before choosing the modelling method(s). This can be done by a more conceptual analysis of the system structure or the system behaviour through qualitative modelling methods, as is common in the systems thinking approach. Based on this, the problematic behaviour of the process/system in which the efficacy of the policy instrument is to be investigated can be analysed more deeply through dynamic simulations of the quantitative modelling methods. This raises the question of whether this should be done in aggregated manner using system dynamics or in more detail using agent-based modelling. One of the central topics in the methods chapter is the field of behavioural modelling, which describes suitable approaches for modelling the behaviour of actors or groups of actors and how to influence them. This ranges from ad hoc approaches through statistical analysis and behavioural theories up to artificial intelligence (AI).

Considering the opportunities and limitations (Chapter 4) of the presented modelling approaches to describe the efficacy of policy instruments regarding complex social issues makes it clear that such modelling approaches can enrich decision support in the field of policy advice. They can complement other policy advice tools and show what effects a decision or policy instrument can have on actors' behaviour and the dynamics of the complex problem or process (e.g. tipping points or unintended side effects). It is important to note that most of the models considered in this report are not forecasting models that explicitly predict how the dynamics will evolve in the future. Rather, they illustrate what interrelationships exist in the system and what impact a change or disruption within the system can have on the non-linear dynamics and behaviour. The reason for this is the complexity of the systems within which the policy instruments operate. In this case, only projections are carried out ("under the assumptions the following can happen...") and no forecasts, as the influencing factors are too complex to make any targeted predictions (e.g. that the policy instrument will ensure that 50% of the actors adopt the proposed policy initiative in 2035).

A major uncertainty factor in quantitative modelling is the required data and its quality, which typically involve observation of human behaviour. Data collection and processing together with the quantification of the model may take too long to incorporate relevant findings for the political decision-making process. That is not the case by qualitative models, which mainly consider the system structure and the associated system behaviour. These can be created comparatively quickly, but can only reflect the behaviour of the system in a qualitative manner. Moreover, such models are per se subjective, as they are based on the limited understanding of the system (mental models) of the modellers and the participants. Nevertheless this can be mitigated through the participatory modelling approach by involving relevant stakeholders (actors) with their diverse understanding of the system in the modelling process. Besides a more complete and comprehensive description of the system, this has other advantages, such as improved ownership of the model, which may lead to increased credibility of the modelling findings, and thus better use of the model within policy advice.

However, the most significant advantage of both qualitative and quantitative modelling approaches for capturing complex systems is that the prevailing linear way of thinking, which

greatly simplifies the problem, is replaced by non-linear viewpoints and the associated non-linear dynamics of the system. This is relevant because complex systems and problems as well as the efficacy of policy instruments within them cannot usually be reduced to a linear cause-and-effect perspective. Since the latter sometimes describe an inadequate simplification of the problem, these decision-making processes may result in mistaken decisions. This problem is attempted to be solved with the help of the modelling of complex systems, above all with the methods of System Dynamics and Agent-based modelling, which take non-linear behaviour into account. Although these methods have advantages, they are not yet systematically used in policy modelling. The reasons for this are diverse and range from a lack of understanding of the model resulting in its low credibility through to resource and expertise challenges.

In the last chapter, the applicability of qualitative and quantitative modelling approaches to the policy field of climate change adaptation is discussed. The question of which modelling methods and approaches are particularly suitable for analysing the efficacy of climate change adaptation policy instruments is addressed in more detail. Along with the question of which problem exactly is to be modelled, we consider that this depends strongly on the development phase of the policy instrument which is to be appraised.

In the early, design phase, qualitative modelling and conceptualisation approaches seem to be more useful, especially those from the broad field of systems thinking. In the further development process, the policy instrument will then be further differentiated. To answer the associated questions within this more detailed elaboration phase of policy instruments, quantitative modelling methods are particularly suitable, demonstrating effects of the policy instrument on the system dynamics and taking into account the actors' perspectives. These include system dynamics, agent-based modelling, cellular automata or empirical modelling. Of course, this subdivision does not only apply to the field of climate adaptation, but to policy instrument development processes in general.

In a second phase of assessing the application of the approaches to the field of climate change adaptation, the use of each of the presented modelling methods was demonstrated using the example of the heat stress reduction through increasing urban greening. This shows the wide range of issues that can be addressed using these qualitative and quantitative modelling approaches. This and the other findings of this research underline the potential of modelling approaches to analyse the efficacies of decisions and policy instruments for use in the policy advice process.

1 Einführung

Anpassungen an den Klimawandel stellen meist komplexe Prozesse dar, deren nicht-lineare, schwer zu erfassende Dynamik von einer Vielzahl von Faktoren abhängt und nicht-intendierte Nebeneffekte auslösen kann. Welche heutigen politischen Entscheidungen und Politikinstrumente können diese Herausforderungen adressieren? Zwischen den globalen Klimaprojektionen, den technischen Bau- und Infrastruktursystemen, den geopolitischen Strukturen, den Ökosystemen, den soziodemografischen Prozessen und der Komplexität des menschlichen Verhaltens kann man sich bei der Vorhersage wirksamer Anpassungsmaßnahmen und -instrumente leicht verirren.

Verschiedene Ansätze befassen sich mit Zukunftsprognosen - und scheinen weder im Widerspruch zueinander zu stehen, noch durch methodische Überschneidungen gestört zu sein. Ein breites Spektrum von Disziplinen, von Vorausschau (*strategic foresight*) (Dreyer & Stang 2013), Politikanalyse (*policy analysis*) (Browne 2019), Politikfolgenabschätzung (*policy impact assesment*) (Acs 2019; Adelle 2012a; Adelle 2012b; Podhora 2013), Komplexitätswissenschaften (Mischen 2008), Entscheidungsunterstützungssystemen (*Decision Support Systems*) (Ritchey 2012), Transformation- oder Transitionsstudien (*transition studies*) (Köhler 2018) bis hin zu strategischem Management und Politik- und Verhaltensmodellierung (Darnton 2008; Estrada 2013; Fuentes 2019; Furtado 2019) versuchen Erkenntnisse für die Einschätzung alternativer Vorgehensweisen zu gewinnen und dadurch die Wirksamkeit der Politikmaßnahmen zu erhöhen.

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projektes „Machbarkeitsstudie: Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit“ (Forschungskennzeichen 3721 48 104 0) des Umweltbundesamtes erstellt. Ziel des Projektes und auch dieser Studie war es, **Modellierungsansätze und -methoden** zu recherchieren, welche geeignet sind, **die Lenkungswirkung zukünftiger Politikinstrumente sowie -maßnahmen zur Klimawandelanpassung zu analysieren und zu bewerten**. Zu diesem Zweck wurden Modellierungsansätze, -methoden und -beispiele aus verschiedenen Bereichen und Disziplinen zusammengetragen. Der Fokus lag dabei auf zwei Modellierungszielen: Einerseits den **komplexen, sektorenübergreifenden Wirkprozess** von Politikinstrumenten zu modellieren und somit die sich durch das Instrument ändernde Dynamik und nicht-intendierte Nebeneffekte zu analysieren (Feld „**Public Policy Modeling**“) und andererseits über den Ansatz der **Verhaltensmodellierung** die Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf die gewünschte Verhaltensänderung der adressierten Akteure abzubilden. Auch die Kombination beider Ansätze stellt eine vielversprechende Analysemethode dar und wurde näher beleuchtet. Hintergrund ist, dass die Bewertung der Machbarkeitsstudie: Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit von Politikinstrumenten generell Analysen der Wechselwirkungen zwischen physikalischen und gesellschaftlichen Wirkungen beinhaltet, was die Integration von natur- und sozialwissenschaftlichen Modellen erfordert (Van Loon 2016). Durch diese Kombination kann nicht nur geprüft werden, ob eine durch ein Politikinstrument geförderte Maßnahme die gewünschte physikalische Wirkung erzielt, sondern - nicht minder relevant -, ob sich die Akteur_innen auch durch das Instrument dazu entscheiden, die Maßnahme umzusetzen.

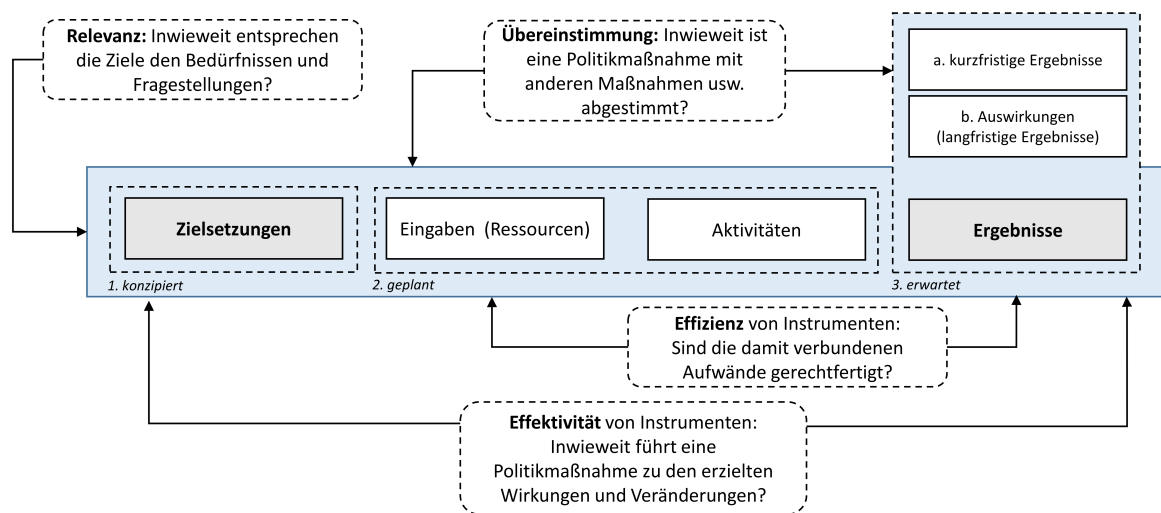
Die Beurteilung von Politikinstrumenten und -maßnahmen kann dabei auf zwei Arten erfolgen: als *policy evaluation* (Ex-post-Bewertung) und als *policy appraisal* (ex-ante-Bewertung) (Adelle 2012a). In dieser Arbeit bewegen wir uns in einem **ex-ante** modus operandi, d. h. der Bewertung der Wirksamkeit von zukünftig angedachten Politikinstrumenten und -maßnahmen. Politische Maßnahmen bzw. Instrumente werden dabei auf allen Ebenen (lokal, regional und bundesweit) und in allen Wirkungsspektren (informativ, fördernd und fordernd) berücksichtigt.

1.1 Wirksamkeitsbewertung

Im Mittelpunkt dieses Projekts steht die Einschätzung der **Wirksamkeit** von Politikinstrumenten und -maßnahmen - ein komplexes Phänomen, das eine kurze Erläuterung benötigt. Was steckt hinter der Frage, ob ein politisches Instrument seine angestrebte Lenkungswirkung auf Adressaten erzielt? Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Prozess der Wirksamkeitsbewertung.

Grundsätzlich wird eine Maßnahme als wirksam bezeichnet, wenn die beabsichtigten Zielsetzungen mit den erwarteten Ergebnissen übereinstimmen. Dabei wird die Wirksamkeit bzw. Lenkungswirkung durch vier Faktoren bestimmt: 1) Relevanz der Zielsetzung, 2) Übereinstimmung der Maßnahmen miteinander, 3) Effizienz und 4) Effektivität. Zentrale Elemente der Abbildung 1 sind die Zielsetzung, die Planung von Ressourcen und bestimmten Aktivitäten sowie die Erzielung von Ergebnissen. Zielsetzungen (*objectives*) spiegeln die gewünschte Veränderung gegenüber einer Ausgangssituation wider und sind an das zu lösende Problem gebunden. Eingaben (*inputs*) beziehen sich auf die Ressourcen, die für die Gestaltung und Umsetzung der Maßnahme eingesetzt werden (Personal, Verwaltungsstrukturen, finanzielle Investitionen usw.) (EEA 2016). Der Vergleich von Beginn und Ende dieser Kette unter Berücksichtigung der oben genannten Einflussfaktoren ermöglicht es, die Wirksamkeit von Politikmaßnahmen oder -instrumenten zu beurteilen (EEA 2016).

Abbildung 1: Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten



Quelle: Übersetzt und überarbeitet von EEA (2016)

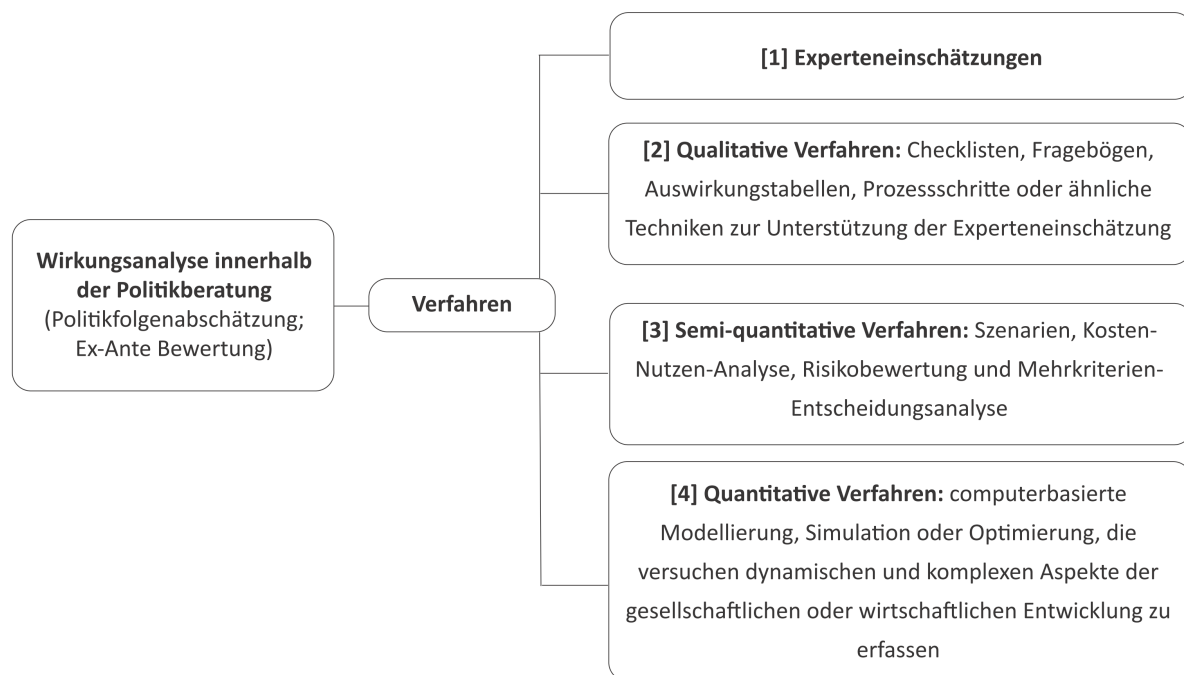
Bei der Einschätzung der Wirksamkeit sollte zwischen Effizienz und Effektivität unterschieden werden. Die **Effizienz** von Instrumenten bezieht sich auf die Frage, ob die damit verbundenen Aufwände gerechtfertigt sind (z. B.: ist es im Vergleich zu anderen Optionen oder im Allgemeinen seine Zeit und sein Geld wert). Die **Effektivität** ist breiter gefasst und spiegelt wider, inwieweit eine politische Maßnahme zu den erzielten Ergebnissen und Veränderungen führt. Diese beiden Arten können sowohl einzeln betrachtet werden, um die Leistungsfähigkeit eines politischen

Instruments oder einer Maßnahme zu analysieren, als auch zusammen als Teil des allgemeinen Konzepts der Wirksamkeit.

1.2 Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten

In diesem Abschnitt wird die Klassifizierung der möglichen Verfahren zur Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten vorgestellt, die in Abbildung 2 nach deren Komplexität eingeordnet wurden (Nilsson 2008). Diese Einteilung stammt aus dem Bereich der Politikanalyse. Im weiteren Verlauf dieses Berichts (Kapitel 3: Modellierungsmethoden) werden ausgewählte Modellierungsmethoden ausführlicher beschrieben und vorgestellt.

Abbildung 2: Klassifizierung von Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten nach deren Komplexität



Quelle: Überarbeitet von Nilsson (2008)

Die Beurteilung der Lenkungswirkung vorhandener und zukünftiger Politikinstrumente sowie -maßnahmen auf den Prozess der Klimawandelanpassung, wie in Abbildung 2 dargestellt, folgt einem Stufenprinzip. (1) Die einfachste Option im Sinne der Komplexitätsreduktion ist die Verwendung von Experteneinschätzungen. (2) Eine etwas umfassendere Variante, welche die Komplexität besser berücksichtigt, ist die Verwendung von qualitativen Strukturierungs- und Modellierungsverfahren, die Experteneinschätzungen unterstützen. Dazu gehören z. B. Checklisten, Impacttabellen oder ähnliche Instrumente. Darauf folgen die (3) semi-quantitativen Strukturierungs- und Modellierungsverfahren, die mehrere Analyseschritte umfassen und (4) quantitative Verfahren, die auf Computersimulationen basieren.

Es ist zu beachten, dass die Tools, die die Komplexität eines Problems am stärksten adressieren, nicht unbedingt die besten sind. Nach der Überprüfung der praktischen Anwendung von Ex-ante-Analysen in der Politik führten, je nach Fragestellung, "einfache" qualitative genauso wie anspruchsvollere quantitative Methoden zu erfolgreichen Ergebnissen (z. B. GOV.UK. 2022a).

Die Abbildung 2 und alle zuvor genannten Aspekte führen zu einer wesentlichen Frage: Welches von den genannten Verfahren und Ansätzen gehört zur **Modellierung**? Auf dieses Thema wird im Folgenden näher eingegangen.

1.3 Politikmodellierung

Wie in Abbildung 2 zu sehen, kann Politikmodellierung entweder im weiteren Sinne als umfassendes Verfahren zur Vorausschau auf die Auswirkungen von Entscheidungen betrachtet werden oder im Sinne einer Methode (z. B. Computersimulationen). In dieser Arbeit wird Modellierung im erweiterten Sinne als vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit verstanden. Das Modell bildet dabei nur einen Teil der komplexen Realität ab, und wie groß dieser Ausschnitt ist, hängt davon ab, wie die Systemgrenzen des Modells festgelegt sind (Stermann 2002). Aus methodischer Perspektive lässt sich ebenfalls unterscheiden zwischen

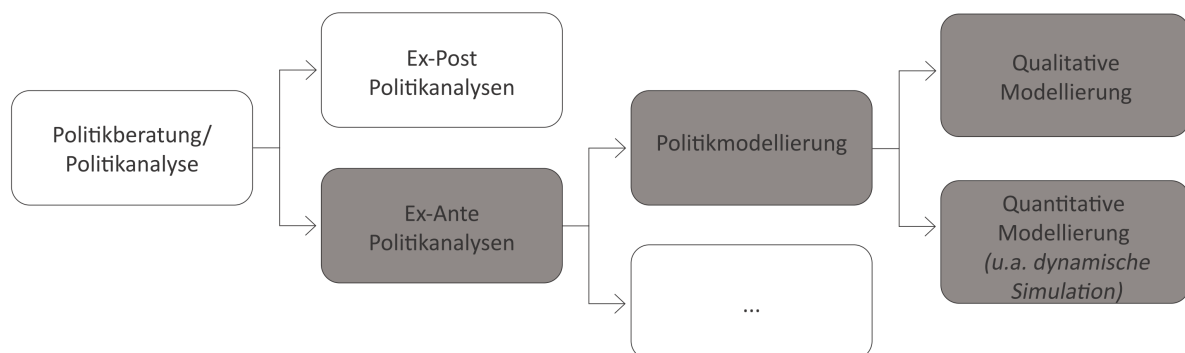
(1) **Qualitativer Modellierung**: einer qualitativen Abbildung eines Systems ohne Quantifizierung der Zusammenhänge und Variablen (Fokus auf Modellstruktur und Prozessabhängigkeiten) und

(2) **Quantitativer Modellierung**: der Darstellung des dynamischen Verhaltens des Systems/ Prozesses durch Simulationen oder stochastischen Analysen eines Systems zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Hierfür muss das Modell mit Daten quantifiziert werden (Ford 1999, Hovmand 2014, Stermann 2002).

Modelle ermöglichen Entscheidungsträger_innen, in einer virtuellen Welt zu experimentieren, anstatt in der realen (Gilbert 2018). Ziel des vorliegenden Artikels ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung im weiteren Sinne darzustellen, sowie Anwendungen und die dafür verwendeten Methoden aufzuzeigen.

Abbildung 3 fasst die beiden möglichen Hauptstränge der Politikanalyse (ex-post und ex-ante) zusammen und verweist auf die Ex-ante-Analyse als Schwerpunkt dieser Studie. Unter den vielen verschiedenen Verfahren zur Ex-ante-Analyse (z. B. Umweltverträglichkeitsprüfung, Kosten-Nutzen-Analyse usw.) befassen wir uns nur mit der Politikmodellierung, bei der es um die Abbildung von realen Systemen in virtuellen Welten geht, welche sowohl auf dem Papier (z. B. qualitative Methoden) als auch auf dem Computer (quantitative Simulationen) existieren.

Abbildung 3: Modellierung in Politikberatung

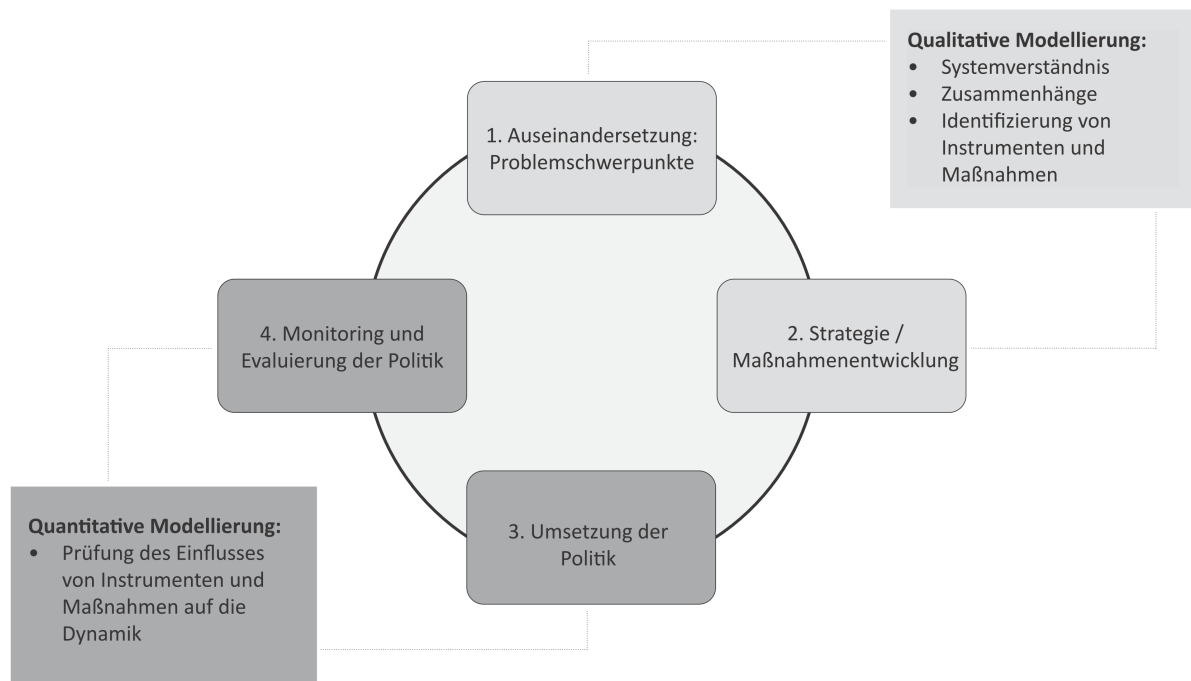


Quelle: eigene Darstellung, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Modellierungen im Politikzyklus (Policy Cycle)

Ob Modellierungsverfahren zur Bewertung von Strategieprozessen und Wirksamkeiten von Politikinstrumenten geeignet sind, hängt unter anderem auch von der Phase des Entscheidungsprozesses ab, in der die Modellierungen zur Politikberatung eingesetzt werden. In den verschiedenen Phasen des Politikzyklus' (der klassischen Darstellungsform der politischen Entscheidungsverarbeitung) sind verschiedene Varianten der Politikmodellierung vorgesehen (Acs 2019). Abbildung 4 zeigt die Beziehung zwischen qualitativer und quantitativer Modellierung und den einzelnen Phasen des Zyklus.

Abbildung 4: Modellierungen im Politikzyklus (Policy Cycle) mit Einbindung qualitativer und quantitativer Modellierung



Quelle: Überarbeitet von Volkery (2009)

In Abbildung 4 haben wir die traditionellen Phasen des Politikzyklus' erweitert, beginnend mit (1) der Identifizierung des Problembereichs und der Herausarbeitung des politischen Problems und der Agenda; gefolgt von (2) der Entwicklung politischer Instrumente und Maßnahmen, d. h. der Formulierung der spezifischen Handlungsformen; danach folgend (3) die Umsetzung des politischen Instrumentes in die Praxis und anschließend (4) die Bewertung der Wirksamkeit der Instrumente nach dessen Einführung (ex-post) und die Beurteilung, inwieweit sie ihren Zweck erfüllt, und, falls erforderlich, die Umgestaltung oder Abschaffung des Instrumentes, womit ein neuer Zyklus begonnen wird.

In der Anfangs- bzw. Konzeptionsphase des Politikzyklus, in der es vor allem darum geht, einen Bezugsrahmen für das Problem zu erarbeiten (d.h. es zu verstehen, sich auf seine Grenzen zu einigen usw.), werden üblicherweise andere Instrumente eingesetzt (vor allem qualitative Modellierungsmethoden) als in der späteren Phase des Politikzyklus', in der konkrete Politikvorschläge und Instrumente auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden (hier sind quantitative Modellierungsmethoden hilfreich) (de Ridder 2007).

Typologie von Modellen: Arten, Funktionen, Zwecke.

Modelle können zu mehreren Zielen eingesetzt werden. Nach Kelly (2013) gibt es fünf Grundtypen von Politikmodellen:

1. Vorhersagemodelle („Prediction“): welche Auswirkungen hat die Änderung einer Variable im System auf dessen Dynamik (meist einfache Modelle),
2. Prognosemodelle („Forecasting“): welche Auswirkungen hat so eine Änderung in der Zukunft, (meist komplexe Modelle; z. B. Klimawandel und dessen Auswirkung auf die Biodiversität),
3. Entscheidungsfindungsmodelle: um zwischen Entscheidungsalternativen die beste Wahl analysieren zu können,
4. Modellieren für sozialen Lerneffekt („Social Learning“): gemeinsames Modellieren zur Verbesserung des Systemverständnisses und Austausch der verschiedenen mentalen Modelle; vor allem bei sektorübergreifenden Problemstellungen wichtig, und
5. Modelle zum Systemverständnis: beinhaltet auch Variablen, die deutlich schwerer zu bestimmen sind als in (1) bis (3).

Andere Autoren haben ebenfalls zahlreiche Ziele von Modellen (Acs 2019; HM Treasury 2013) sowie verschiedene Gründe für eine Modellierung identifiziert (Epstein 2008; Greenberger 1976; Hodges & Dewar 1992), aber insgesamt führt es zum Kern eines jeden Modellierungszwecks: seine Funktionalität sollte das primär zu berücksichtigende Kriterium sein (Badham 2015). Für den Umgang mit Politikfragen gibt es drei große Funktionsgebiete, die besonders wichtig sind: Wissenssynthese, Behandlung von Unsicherheit und Politikunterstützung (Bammer 2013). Für jede dieser Funktionen können Modelle nützlich sein.

Zur Orientierung in den verschiedenen Typen und Ansätzen der Politikmodellierung wurde eine Vielzahl von Klassifizierungen vorgenommen - eine einheitliche Systematisierung gibt es jedoch nicht, da die Zusammenhänge zwischen Ansätzen, Methoden und Modellierungszwecken stark voneinander abweichen (Adelle 2012b; Turnpenny 2009) (siehe Kapitel 3.2).

Es existiert kein einheitlicher und allgemein anerkannter Weg zur Politikfolgenabschätzung und Modellierung, stattdessen finden sich in der Literatur viele verschiedene Bewertungsverfahren. Und obwohl alle Modellierungsverfahren eine gewisse Einzigartigkeit aufweisen, gibt es doch starke Komplementaritäten und Überschneidungen zwischen den verschiedenen Verfahren, was die Methoden multifunktional macht und den Entscheidungsträger_innen die Möglichkeit gibt, sehr flexibel und beweglich in der Analyse zu sein (de Ridder 2007)

1.4 Verhaltensmodellierung

Die Modellierung des Verhaltens bzw. der Verhaltensänderung von Menschen im Rahmen der öffentlichen Politik ist ein relativ neues Feld der Modellierung und Politikberatung. Es ist Gegenstand der Forschungsarbeiten und ethischen Diskussionen in den Bereichen der Verhaltensökonomie und -modellierung mit der zentralen Frage, **wessen Verhalten auf welche Weise und zu welchem Zweck** geändert werden soll und darf. Für die Bewertung der Wirksamkeit von zukünftigen Politikinstrumenten im Ex-ante-Bereich ist neben des Verständnisses der komplexen Dynamiken, die das Instrument auslösen kann, die Frage zu klären ob es dadurch zu der intendierten Verhaltensänderung bei den Akteur_innen bzw. der Akteursgruppe kommt. Dieser zentralen Frage stellt sich im Ex-ante-Bereich der Politikberatung die Verhaltensmodellierung, die über Entscheidungsregeln versucht das individuelle Verhalten von Akteuren bzw. das aggregierte Verhalten von Akteursgruppen zu erfassen (Schrieks 2021). Dabei geht es im Kern darum Entscheidungsprozesse von Akteur_innen abzubilden, d. h. unter welchen Umständen entscheidet sich eine Person oder Personengruppe z. B. für die Umsetzung

einer Maßnahme. Dieser Entscheidungsprozess ist von Natur aus nicht linear und rational, sondern komplex und durch begrenzte Informationen sowie irrationale Verhaltensweisen geprägt (Schrieks 2021). Die Ansätze, die für die Abbildung dieser Entscheidungsregeln verwendet werden, sind äußerst vielseitig. Sie reichen von einfachen Ad-hoc-Annahmen über psychologische und ökonomische Verhaltenstheorien bis hin zu Methoden der künstlichen Intelligenz/maschinellen Lernverfahren/künstlichen neuronalen Netzen. Die große Herausforderung bei der Verhaltensmodellierung ist die Quantifizierung der relevanten Entscheidungsregeln der Akteur_innen bzw. Akteursgruppen (Schrieks 2021). Diese dürfen nicht zu stark vereinfacht im Modell abgebildet sein, um die Komplexität und teilweise Irrationalität von Entscheidungsprozessen abzubilden, jedoch vereinfacht genug, um diese über verschiedene Ansätze (z. B. Befragungen, Experteneinschätzungen, Data Science etc.) parametrisieren zu können. Die Verhaltensmodellierung kann in Modellierungsansätzen zur Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten (z. B. Agentenbasierte Modellierung (ABM) oder *System Dynamics (SD)*) dann als „Modul für menschliche Entscheidungsfindung“ (Schrieks 2021) integriert werden. Durch diese Art der Einbindung der Akteursentscheidungen in die Modellierung kann geprüft werden, ob die Maßnahme, die durch ein Politikinstrument gefördert wird, nicht nur physikalisch wirksam ist, sondern ob das Instrument auch dazu beiträgt, dass diese Maßnahme von den Akteur_innen auch wirklich umgesetzt wird. Weitere Details zu Ansätzen der Verhaltensmodellierung und zu Verhaltenstheorien finden Sie im Kapitel 3.4.

Behavioural Insights (BI), d. h. Erkenntnisse aus den Verhaltens- und Sozialwissenschaften einschließlich der Entscheidungsfindung, der Psychologie, der Kognitionswissenschaft, der Neurowissenschaften sowie des Organisations- und Gruppenverhaltens, werden angewandt um nachzuvollziehen, wie Einzelpersonen (sowie Organisationen) Entscheidungen treffen und wie diese Entscheidungen in eine gewünschte Richtung gelenkt werden können. Der BI-Ansatz ist erkenntnisorientiert und richtet sich auf das Verständnis der tatsächlichen Ursachen für das Verhalten der Bürger_innen, anstatt davon auszugehen, wie sie sich am besten verhalten sollten. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Politik die tatsächlichen Bedürfnisse und Verhaltensweisen berücksichtigt, um mehr Wirksamkeit und Effektivität zu erzielen. Vorreiter bei der Erfassung und Erforschung des praktischen Nutzens von BI in der öffentlichen Politik ist die *Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)* (OECD 2017; Hansen 2019) und die meisten (offenen) Fallstudien über den Einsatz von BI in der Politik stammen aus dem Vereinigten Königreich, Australien und Kanada (OECD 2017).

1.5 Methodik der Modellierungsrecherche

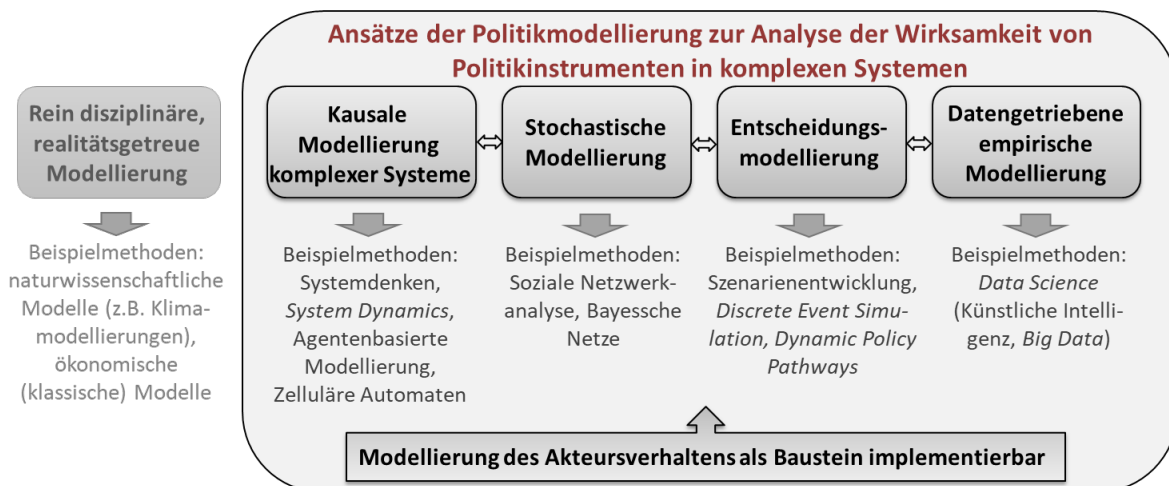
Das Feld der Modellierung innerhalb der Politikberatung umfasst verschiedene Ansätze und Bereiche der Modellierung aus unterschiedlichsten Disziplinen. Diese sind vereinfacht im Schema in Abbildung 5 dargestellt. Der Fokus unserer Recherche lag auf Modellierungsansätzen zur Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten in komplexen Prozessen bzw. Systemen, auch mit Blick auf Veränderungen im Akteursverhalten. Aus diesem Grund entfällt das große Feld der rein disziplinären, realitätsgetreuen Modellierung für unsere Betrachtungen, wie sie bei rein naturwissenschaftlichen oder klassischen ökonomischen Modellen üblich ist. Die naturwissenschaftlichen Modelle bewerten, ob eine Maßnahme, gefördert durch ein Politikinstrument, ihre gewünschte physikalische Wirkung erzielt. Die klassisch-ökonomischen Modelle fokussieren meist auf die Kosten-Nutzen-Analyse von Politikinstrumenten.

Das interdisziplinäre Feld der Modellierung komplexer Systeme bzw. Problemstellungen und Prozesse ermöglicht über verschiedenen Methoden die Wirkung von Entscheidungen auf die Dynamik des Prozesses und auf das Akteursverhalten abzubilden und zu projizieren. Beispielmethoden sind hier das Systemdenken bzw. *System Thinking* (inklusive Kausalkarten,

Wirkungsdiagramme, *Fuzzy Cognitive Maps*), *System Dynamics*, agentenbasierte Modellierung oder zelluläre Automaten. Neben diesem Feld wird bei der stochastischen Modellierung versucht, Entscheidungsprozesse in ihrer Auswirkung auf betroffene Akteure stochastisch zu erfassen. Beispiele hierfür sind die soziale Netzwerkanalyse oder auch die Bayesschen Netze. Die Entscheidungsmodellierung ist eng mit dem Feld der stochastischen Modellierung verwandt und versucht die Auswirkung von Entscheidungsprozessen mit Methoden wie der *Discrete Event Simulation* oder *Dynamic Policy Pathways* abzubilden.

Der Bereich der datengetriebenen, empirischen Modellierung (basierend auf künstlicher Intelligenz und *Machine Learning*) mit Methoden der *Data Science* versucht die Zusammenhänge zwischen der intendierten Lenkung von Akteuren und dem beobachteten Akteursverhalten empirisch auf Grundlage der Auswertung großer Datenmengen zu erfassen. Wichtig anzumerken ist, dass die vorgenommene Unterteilung der Ansätze in Abbildung 5 fließend ist und häufig auch Ansätze miteinander kombiniert werden. Zudem handelt es sich um eine stark vereinfachte Darstellung mit dem vorrangigen Ziel der Erläuterung, dass die in der Politikberatung klassischerweise genutzten rein disziplinären, realitätsgetreuen Modellierungen hier nicht Fokus der Recherche waren, da diese die Wirkung von Politikinstrumenten auf Akteure unzureichend abbilden können. Die anderen vier hervorgehobenen Modellierungsansätze in Abbildung 5 können die Komplexität von Prozessen auf unterschiedliche Art abbilden und sind daher Gegenstand der vorliegenden Studie. In diese Modellierungsansätze können als Baustein auch Elemente der Verhaltensmodellierung (siehe z. B. Darnton 2008) implementiert werden, um genau zu untersuchen, wie sich das Akteursverhalten durch die Implementierung eines Politikinstrumentes ändern kann.

Abbildung 5: Vereinfachte schematische Darstellung der Bereiche und Ansätze der Politikmodellierung mit Hervorheben der Modellierungsmethoden, welche die Wirksamkeit von Politikinstrumenten in komplexen Systemen analysieren können



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

Die Auswahl der Modellierungsansätze und -methoden (Kapitel 3) sowie der Anwendungsbeispiele (Kapitel 2) war ursprünglich in Form einer strukturierten Literaturrecherche geplant, doch die Auswertung von akademischen und Modelldatenbanken erbrachte keine strukturierten Erkenntnisse. Dies ist ein verbreitetes methodisches Dilemma, auf das zum Beispiel Acs et al. (2019) hinwiesen: die Autor_innen betonen, dass es sehr schwierig ist, durch eine systematische Literaturanalyse die Art eines Modells, seine Merkmale, seine

Bedeutung und seine tatsächliche Implementierung zu erkennen, da es bei der Modellbeschreibung häufig an Transparenz und einer Art von Standardisierung fehlt. Auf ähnliche methodologische Schwierigkeiten weisen auch Darnton et al. (2008) hin, die eine Übersicht über praktisch angewandte Modelle (im Bereich der Verhaltensmodellierung) erstellt haben. Die Einbindung von grauer Literatur (meist interne Open-Source-Beiträge von Regierungsorganisationen oder Beratungsagenturen) in den Prozess unserer Recherche war aufgrund des wissenschaftlichen Charakters dieses Berichts eine besondere Herausforderung.

Deshalb wurde beschlossen, den ursprünglichen deduktiven bibliometrischen Ansatz, bei dem relevante Literaturquellen anhand von vorgegebenen Schlagwörtern und deren Kombinationen durchsucht werden sollten, durch den kontrastierenden induktiven Ansatz zu ersetzen, bei dem die relevanten Literaturquellen untersucht, strukturiert und dann in übergeordnete Themen und Unterthemen unterteilt werden.

Wir haben die Informations- und Quellenerfassung ausgeweitet, indem wir Kontakt zu Expert_innen im Bereich der Politikmodellierung aufgenommen haben, um ihre Fachkenntnis in Bezug auf Literaturquellen, Modellierungsansätze und mögliche Anwendungsbeispiele mit einzubeziehen. Zwischen Mai und Juni 2022 wurden mehrere Expert_inneninterviews geführt, um Einblicke in die praktische Umsetzung von Politikberatungsmodellen zu erhalten. So konnte der Schneeballeffekt genutzt werden, um einige Modellentwickler_innen und ihre Projekte aufzufinden (hierbei ist es wichtig zu beachten, dass es in Bezug auf praktische Beispiele, wie schon erwähnt, häufig graue Literatur zu entdecken ist) und die Vollständigkeit der zuvor identifizierten Methoden zu überprüfen. Die Anwendungsbeispiele in Kapitel 2 wurden auch durch die Suche nach Regierungswebseiten und Think Tanks erweitert, da diese am wahrscheinlichsten in der Lage sind, als Benutzer_innen von Politikmodellen Informationen über mögliche Anwendungsmöglichkeiten zu liefern. Im Folgenden werden die Anwendungsmöglichkeiten von Modellen in verschiedenen Politikbereichen und Ländern aufgezeigt (Kapitel 2), die ausgewählten qualitativen und (semi-)quantitativen Modellierungsmethoden dargestellt, wobei ein besonderer Fokus auf die Modellierung komplexer Fragestellung und sozialer Aspekte gelegt wird (Kapitel 3), die wesentlichen Möglichkeiten und Grenzen der Computermodellierung diskutiert (Kapitel 4) sowie die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf das Themenfeld der Anpassung an den Klimawandel dargestellt werden (Kapitel 5).

2 Anwendungsbeispiele der Modellierung zur Einschätzung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten und -maßnahmen

In diesem Kapitel wird eine Reihe von Anwendungsbeispielen von Modellen in verschiedenen Politikfeldern und in ausgewählten Regionen vorgestellt. Ziel ist dabei nicht, alle verfügbaren Beispiele umfassend und systematisch zu analysieren bzw. zu beschreiben. Vielmehr soll ein Einblick in mögliche Anwendungen aufgezeigt und die Vielfalt an Verwendungsmöglichkeiten dargelegt werden. Daher wurden die in diesem Kapitel beschriebenen Beispiele stichprobenartig und illustrativ ausgewählt. Im Unterkapitel 2.1 werden Modellierungsbeispiele aus der Praxis der Politikberatung vorgestellt, d. h. Modelle, die in politischen Entscheidungen auch tatsächlich verwendet wurden. Die Beispiele fokussieren auf die Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten durch Abbildung der komplexen Wirkungsprozesse und/oder durch deren Wirkung auf das Akteursverhalten. Die Beispiele basieren vorwiegend auf Quellen aus grauer Literatur, also größtenteils nicht wissenschaftliche Literatur. Im Unterkapitel 2.2 hingegen wurde die wissenschaftliche Literatur nach Modellierungsbeispielen im spezifischeren Feld der Klimawandelanpassung durchsucht. Die Vorgehensweise der Recherche ist in Kapitel 1.5 beschrieben. In Abschnitt 2.3 wird eine abschließende Einordnung der vorgestellten Beispiele von Modellierungen für die Politikberatung geben.

2.1 Beispiele aus der Praxis der Politikberatung

Alle in diesem Abschnitt vorgestellten Modellierungsbeispiele kommen aus der Praxis der Politikberatung und beziehen sich auf die folgenden Politikfelder:

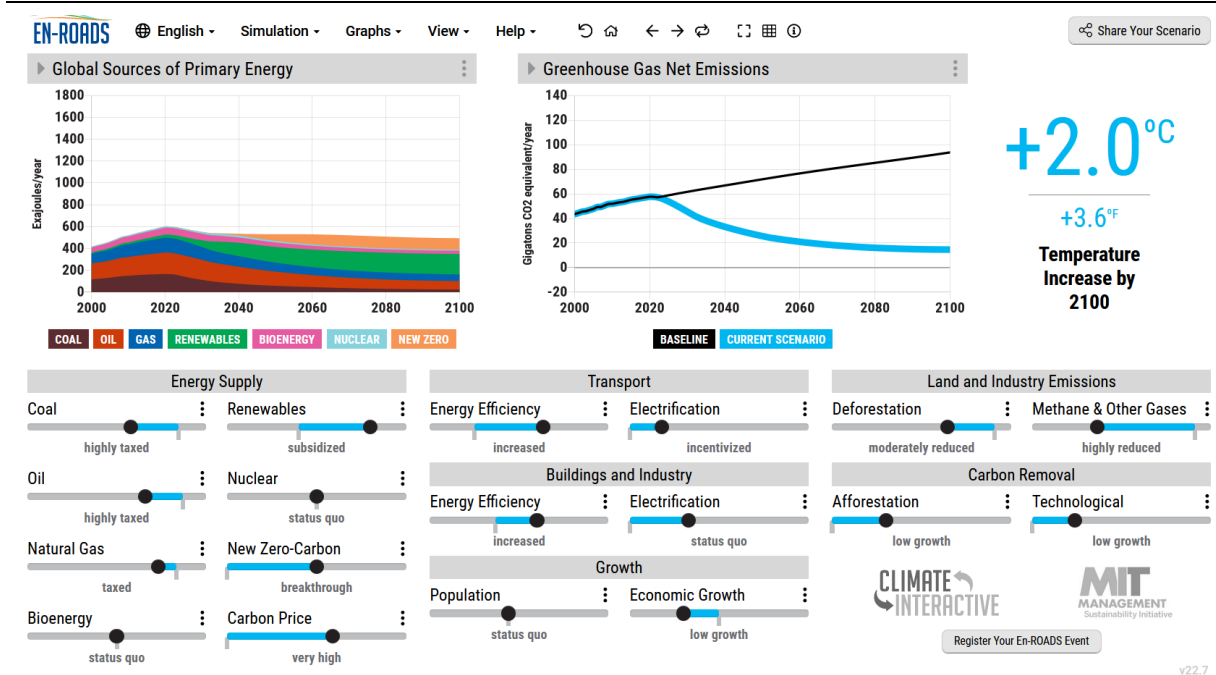
- ▶ Klimaschutz
- ▶ Verkehr
- ▶ Energie
- ▶ Wassermanagement
- ▶ Stadtplanung
- ▶ Finanzpolitik
- ▶ Epidemiologie

Der explizite Fokus der Anpassung an den Klimawandel wird in den jeweiligen Politikbereichen ebenfalls kurz dargestellt, wird jedoch im folgenden Abschnitt 2.2 genauer beleuchtet. Die Beispiele für die Politikmodellierung stammen hauptsächlich aus öffentlichen Informationsquellen sowie aus dem Projektarchiv von staatlich anerkannten Beratungsstellen oder Forschungseinrichtungen (d. h. aus Material, das von Regierungsbehörden auf lokaler, Landes-, Bundes- und internationaler Ebene sowie von staatlich anerkannten Institutionen und Organisationen erstellt wird). Wo verfügbar, werden die Informationen zu den angewandten Modellen auch durch wissenschaftliche Literatur ergänzt. Dabei wurden Praxisbeispiele vorwiegend in folgenden Regionen gefunden: Europäische Union (EU), Großbritannien, USA, Australien. Die in diesem Abschnitt erwähnten Modellierungsmethoden werden im nächsten Kapitel kurz vorgestellt. Es bleibt anzumerken, dass die Aufzählung an Modellierungsbeispielen nicht vollständig ist, sondern lediglich einen Überblick geben soll.

2.1.1 Klimaschutz

Die Eindämmung der globalen Klimaerwärmung und damit einhergehende Reduktion der Treibhausgasemissionen ist eine Herausforderung, für die es eine Vielzahl an Ansätzen gibt, wie z. B. die Transformation des Energiesektors, des Verkehrssektors, Erhöhung der Energieeffizienz, Aufforstung und Umstellung der individuellen Lebensstile in einem Land. Um der Vielzahl der an diesem Prozess beteiligten Entscheidungsträger_innen zu veranschaulichen, wie sich verschiedene Ansätze auf die Dynamik der Erderwärmung auswirken und wie diese interagieren, wurde der Online-Politiksimulator EN-ROADS (siehe von Climate Interactive und der MIT Management Sloan School (US)) mit Unterstützung der Ventana Systems und der UML Climate Change Initiative entworfen. Dieser basiert auf einem umfangreichen *System Dynamics* Modell, das die Dynamik der Wirkungszusammenhänge in einem Planungsspiel erlebbar macht, mit langfristigen Auswirkungen von Klimastrategien für verschiedene regionale Gruppen zu testen und zu visualisieren. Mit EN-ROADS können rund 30 politische Maßnahmen, wie z. B. die Elektrifizierung des Verkehrs, die Bepreisung von Kohlenstoffdioxid oder die Verbesserung landwirtschaftlicher Praktiken auf ihre dynamische Auswirkung in der Zukunft analysiert werden. Abbildung 6 bietet einen Überblick über die Benutzeroberfläche des Simulators.

Abbildung 6: Screenshot des Online-Politiksimulator EN-ROADS



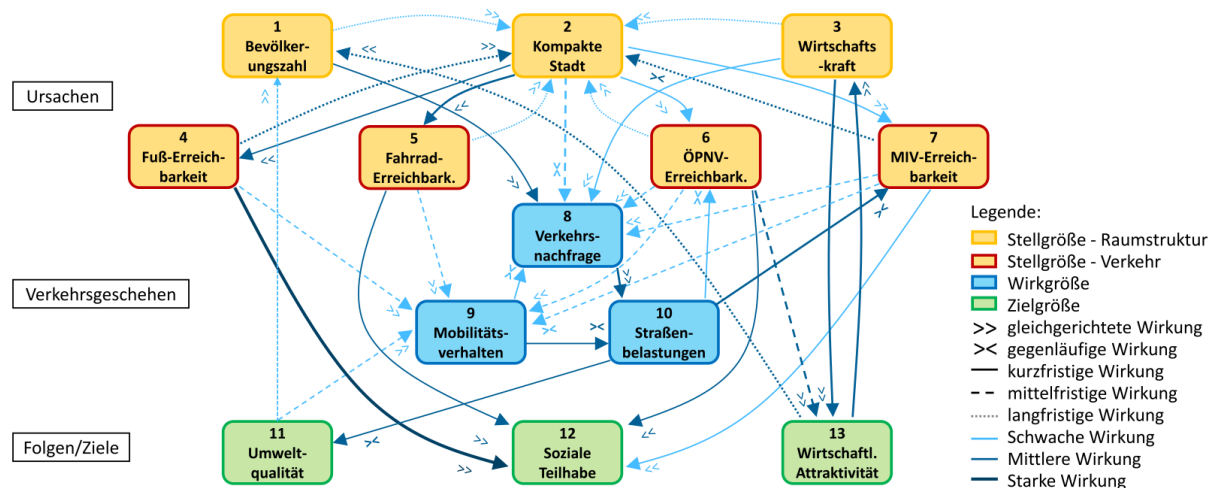
Quelle: Climate Interactive: EN-Roads

2.1.2 Verkehr

Im Rahmen der MobilitätsWerkStadt 2025 vom BMBF wird das Forschungsvorhaben MobiLe (Brüning 2022) gefördert. In diesem werden die komplexen Wirkungszusammenhänge des urbanen Verkehrssystems der Stadt Norderstedt (Deutschland) mit Hilfe eines qualitativen *Fuzzy Cognitive Mapping* Modells abgebildet (siehe Abbildung 7). Darauf aufbauend wird ein webbasiertes Planungstool entwickelt, das die Kommunalpolitiker_innen in die Lage versetzen soll, die Komplexität und Interdependenzen des kommunalen Verkehrssystems besser zu verstehen und in ihren Entscheidungen zu berücksichtigen. Entsprechend werden auch die dynamischen, nicht-linearen Auswirkungen von Politikinstrumenten und Maßnahmen auf die nachhaltige Transformation des Verkehrssystems qualitativ aufgezeigt und deren Wirksamkeit

sowie Nebeneffekte abgeschätzt. Dies sind z. B. die Wirkung von Radverkehrskonzepten oder die Stärkung des öffentlichen Personennahverkehrs. Besonders hervorzuheben ist in diesem Vorhaben, dass das Wirkmodell gemeinsam mit Kommunalpolitiker_innen aller Fraktionen der Stadt Norderstedt erstellt wurde. Durch diesen partizipativen Modellierungsansatz soll die Glaubwürdigkeit des Modells und somit die folgende tatsächliche Verwendung des Planungstools deutlich erhöht werden. Das Projekt zielt zusammenfassend entsprechend darauf ab, eine neuartige Entscheidungshilfe für Kommunalpolitiker_innen bei verkehrsbezogenen Entscheidungen zur Verfügung zu stellen, die das Verkehrssystem in ihrem systemischen Zusammenspiel der nachhaltigen Stadtentwicklung modelliert.

Abbildung 7: Fuzzy Cognitive Modell des Verkehrssystems im Forschungsvorhaben Mobile (Stadt Norderstedt)



Quelle: Brüning (2022) – Stand: 9/2022, aktuell in Überarbeitung

Auf EU-Ebene wurde ein umfassendes systemdynamisches Modell der integrierten Mobilitätswende erstellt. **Powertrain Technology Transition Market Agent Model (PTTMAM)** zielt darauf ab, politische Optionen und Marktentwicklungen besser zu verstehen und zu analysieren und berücksichtigt die Interaktionen und Rückkopplungen zwischen den relevanten Interessengruppen. Die Modellentwicklung, die von *Ventana* (Großbritannien) zusammen mit *JRC* internen Experten durchgeführt wurde, umfasste drei Phasen: (i) Qualitative Darstellung der Marktmechanismen, die zur Verbreitung neuer Technologien auf dem Markt führen (in einem Kausaldiagramm); (ii) Entwicklung eines quantitativen Simulationsmodells und (iii) Erstellung eines kalibrierten Basisszenarios und Durchführung von Szenarioanalysen (Harrison 2016). Untersucht wurde das Zusammenspiel von Politikinstrumenten und -maßnahmen, wie z. B. Kaufsubventionen. Abbildung 8 veranschaulicht ein Kausaldiagramm, in dem die Einflussfaktoren auf die Entscheidungsfindung aufgezeigt werden.

Abbildung 8: Beispiel für ein Kausaldiagramm, eingebunden in ein umfassenderes Modell (PTTMAM)

Treibhausgasemissionen des Vereinigten Königreichs bis 2050 und darüber hinaus auf Null reduzieren könnte, indem unterschiedliche "Ambitionsstufen" für die Dekarbonisierung verschiedener Bereiche des Energiemarktes ausgewählt werden können. Der Calculator zeigt dann, wie sich diese Entscheidungen auf die Gesamtemissionen des Landes auswirken und soll dazu beitragen, dass sich jeder an der Diskussion beteiligt (GOV.UK. 2020).

Abbildung 9: Screenshot des MacKay Online-Kohlenstoffrechners



Quelle: GOV.UK. (2020)

Zukunftsprojektionen im Energiesektor wurden für Deutschland mit Hilfe von quantitativen Szenarien im Modell **FORECAST** erstellt. Darin werden verschiedene Aspekte der Energieversorgung untersucht, z. B. Szenarien für die zukünftige Nachfrage nach einzelnen Energiequellen, wie Strom oder Erdgas, die Berechnung von Energieeinsparpotenzialen und die Auswirkung auf die Treibhausgasemissionen sowie Ex-ante-Bewertungen der Wirksamkeit von Politikmaßnahmen (siehe: FORECAST). Das Modell bietet eine Reihe von Möglichkeiten zur Einbeziehung von Energieeffizienzmaßnahmen in die Simulation, wie z. B. Energiebesteuerung oder informatorische Maßnahmen (siehe: FORECAST). Zur Veranschaulichung kann ein Artikel von Maçaira et al. (2020) betrachtet werden, in dem die folgenden Politiken und Maßnahmen zur Energieeffizienz im Wohnungssektor in Brasilien modelliert und simuliert wurden: Nationaler Energieeffizienzplan, brasilianisches Labeling Programm, Nationales Programm zur Einsparung von Strom, PROCEL-Siegel, Nationales Programm zur Rationalisierung der Verwendung von Erdöl- und Erdgasderivaten, Gesetz zur Energieeffizienz und Gesetz zum Verbot von Glühbirnen.

2.1.4 Wassermanagement

Das britische Ministerium für Umwelt, Ernährung und Landwirtschaft (*Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA)*) sowie die Walisische Umweltbehörde und Naturschutzbehörde haben als Antwort auf zukünftige wasserwirtschaftliche Herausforderungen ein integriertes Bewertungsmodell (IAM) entwickelt, das ein hydrologisches und ein agentenbasiertes Modell kombiniert. **The Abstractor Behaviour Model** (auf Deutsch: Modell des Wasserentnahmeverhaltens) wurde von der britischen Beratungsfirma *Risk Solutions* (Risk Solutions: Water Abstraction Reform, 2022) erstellt und bewertet umfassend die potenzielle Wirksamkeit von Reformen der Wassermanagementpolitik. Der Aufbau des Modells lässt sich so beschreiben: Die Agentenpopulation besteht aus allen Unternehmen, die eine Lizenz zur Wasserentnahme in einem bestimmten Flusseinzugsgebiet haben. Das Flusseinzugsgebiet wird mithilfe eines hydrologischen Modells detailliert modelliert. Jeder Akteur trifft eine Reihe strategischer und operativer Entscheidungen, die sich im Laufe der Zeit weiterentwickeln, da sich Wasserbedarf und -verfügbarkeit mit dem wirtschaftlichen und klimatischen Wandel verändern. Die Politik steuert die Wasserstände durch verschiedene Maßnahmen (z. B. regulativ vorgeschriebene Wasserentnahmemengen) und ermöglicht unterschiedliche Handelsmöglichkeiten für Wasserrechte zwischen den Akteuren.

Anhand dieses Modells konnten die verschiedenen Optionen für eine Reform des Wassermanagementsystems bewertet werden, wobei auch berücksichtigt wurde:

- ▶ Wechselwirkungen zwischen dem komplexen Umweltsystem und den Wasserverbraucher_innen (einschließlich der öffentlichen Wasserversorgung, der Stromerzeuger, der Landwirtschaft und der Industrie),
- ▶ dass sich die wirtschaftlichen, sozialen und klimatischen Bedingungen in nicht vorhersehbarer Weise ändern werden, und
- ▶ dass die neuen Maßnahmen das Verhalten der einzelnen Wasserverbraucher_innen von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr auf vielfältige Weise beeinflussen werden.

Dieses Modell deckte viele unerwartete und oft unerwünschte Auswirkungen auf und ermöglichte es so, die Gestaltung der Reformen zu verbessern (DEFRA 2013; DEFRA 2014; DEFRA 2015). Die verschiedenen politischen Optionen wurden auf der Grundlage des Konzeptes der Bounded Rationality (mehr dazu in 3.4: Verhaltensmodellierung) untersucht - das Team führte über 60 Workshops durch, um zu verstehen, wie die Wasserverbraucher das Wasser nutzen und wie sie auf die verschiedenen Bestandteile der vorgeschlagenen Politikmaßnahmen reagieren würden, was die Eingangsdaten für das agentenbasierte Verhaltensmodul des Modells lieferte (OECD 2017).

Die Erfahrungen der australischen Wissenschaftler_innen des Forschungszentrums *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)* wurden zudem verwendet, um ein integriertes Wassermanagementmodell für zukünftige Herausforderungen in Chile zu erstellen. **'SimRapel: Participatory Modelling for Water Governance'** besteht aus vielen Schritten und Teilmodellen und reicht von qualitativen partizipativen Modellierungsmethoden (partizipatives Systemdenken) bis hin zu den anspruchsvolleren quantitativen Verfahren (Agentenbasierte Modellierung; Entscheidungsorientierte Modellierung; Modellierung von Wasserfluss- und Extremereignisvorhersagen). Das Hauptergebnis dieses komplexen Modellierungsprojekts ist die Verbesserung des integrierten Wassermanagements im Flussgebiet und die Weiterentwicklung von Wassermanagementstrategien (CSIRO 2019a; CSIRO 2019b).

2.1.5 Finanzpolitik

In den Niederlanden wurde das verhaltensorientierte, agentenbasierte Modell **MICSIM 2.0** entwickelt, um die Reaktionen der Individuen auf Änderungen bei Sozialleistungen und Steuern zu erkennen (De Boer 2020). Die Steuerreform wurde ebenso von der britischen Regierung modelliert, als sie ein neues Steuersystem in Großbritannien entwickelte. Mit Hilfe eines *Causal Loop Diagramms (System Thinking)* wurden die Schlüsselfaktoren des neuen Steuersystems ermittelt, um eine möglichst effiziente Umsetzung zu gewährleisten. Die Anwendung des Systemdenkens bei diesem Projekt hat dazu geführt, dass das Steuersystem erfolgreich implementiert werden konnte (GOV.UK 2022a).

Ein weiteres erwähnenswertes Modell, **STINMOD+**, wurde für die Analyse des australischen Bundesbudgets verwendet. Es ist ein statisches Mikrosimulationsmodell für die Steuer- und Sozialversicherungspolitik, das zur Bewertung der Verteilungs- und fiskalischen Auswirkungen von Steuer- und Transfermaßnahmen verwendet werden kann. Das Modell verknüpft die Mikrodatsätze aus nationalen Umfragen mit den Haushaltsdaten und kann daher eine Analyse der politischen Auswirkungen anhand verschiedener demografischer Parameter, wie z. B. Haushaltseinkommen, Bezirk oder Haushaltstyp, erstellen (NATSEM: STINMOD+).

2.1.6 Stadtplanung

Die Modellierung im Bereich der Stadtplanung kann anhand folgender Beispiele veranschaulicht werden. Ein spielerischer Ansatz zur Einbindung der Bevölkerung durch digitale Simulationen wurde in einem Projekt der Regierung von Boston (USA) mit dem Titel **Participatory Chinatown** verwendet. Die Bürger_innen wurden mit Hilfe des Spiels in eine Reihe von Nachbarschaftsaktivitäten in einer digitalen Simulation von Bostons Chinatown einbezogen, um den Behörden bei der Erarbeitung eines 10-jährigen Gesamtentwicklungsplans für Chinatown zu helfen. Als zugewiesene Charaktere wurden die Teilnehmer_innen gebeten, eine Reihe von Aktivitäten innerhalb des Spiels zu erledigen - einen Job zu finden, einen Ort zum Wohnen oder einen Treffpunkt zu wählen. Die virtuellen Bewohner_innen, die zur Auswahl standen, hatten jeweils einen bestimmten sozialen Hintergrund, eine Reihe von Zielen und Werten sowie individuelle Umstände, die sich auf die Aufgaben auswirkten, die sie übernahmen. So konnten die Bürger_innen verschiedene Entwicklungsszenarien für den Stadtteil betrachten und anschließend in einem Live-Format mit Entscheidungsträger_innen mitdiskutieren. So entstand eine persönliche, kollaborative Atmosphäre, die dazu beitrug die gesellschaftliche Wirksamkeit potenzieller stadtentwicklungspolitischer Maßnahmen einzuschätzen (City of Boston 2010; Gordon 2011).

Abbildung 10: Bildausschnitt aus dem Serious Game Participatory Chinatown



Quelle: Gordon (2011)

Eine weitere kollaborative Modellierungsübung wurde von der *MIT City Science* Gruppe durchgeführt, welche die datengesteuerte Plattform **CityScope** entwickelt hat, um den Regierungsbehörden, Stadtplaner_innen und Bürger_innen dabei zu helfen, die urbanen Szenarien durch die Wirkungsanalyse verschiedener städtischer Interventionen gemeinsam zu gestalten. Grundlage des Projekts war ein agentenbasiertes Modell, das die Verhaltensmuster der Bürger_innen in Bezug auf die Wahl von Wohnraum und Mobilität beschreibt. Die realitätsnahe Bestimmung und Darstellung der Faktoren, die diesen Entscheidungsprozess beeinflussen, sollte dazu beitragen, die Auswirkungen potenzieller wohnungspolitischer Anreize zur Förderung von Gleichheit, Vielfalt und Barrierefreiheit in Städten zu bewerten und zu analysieren. Die Kalibrierung und Validierung des Modells wurde an dem *Kendall Square* in Cambridge (USA) durchgeführt. Die Umsetzung dieses Modells in die Praxis wird momentan weiter vorangetrieben (Yurrita 2021).

2.1.7 Epidemiologie

Politikmodellierung und -simulation im Bereich der Epidemiologie befasst sich mit der Vorausschau von Ausbruchsdynamiken sowie mit den Auswirkungen von Verhaltensänderungen auf die Übertragungsdynamik und Steuerungsmaßnahmen. Antworten auf die Fragen, wie die Menschen sich aufgrund bestimmter Faktoren verhalten und wie sie auf zentral vorgegebene Maßnahmen reagieren, ermöglichen es den Entscheidungsträger_innen herauszufinden, welche Maßnahmen am besten geeignet sind und wann und wie sie effektiv eingesetzt werden können, um die gesellschaftliche Akzeptanz zu gewinnen. Im Rahmen vom EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation *Horizon 2020* wurden auf EU-Ebene mehrere Projekte entwickelt, die sich mit der Bewertung der gesellschaftlichen Dynamiken auseinandersetzen, um die politischen Maßnahmen auf Covid-19-Ausbrüche zu verbessern (European Commission 2020; European Commission 2021). In dem Projekt **HERoS** (Health Emergency Response in Interconnected Systems), das die Wirksamkeit der Maßnahmen bei Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID)-Ausbrüchen verbessern soll, wurde das agentenbasierte Modell (ABM) einer virtuellen Stadt entwickelt und auf zwei Beispielstädte (Den Haag/Niederlande; Helsinki/Finnland) angewendet (Sirenko 2020). In dem weiteren *Horizon 2020* Projekt **EpiPose** (Epidemic intelligence to minimize 2019-nCoV's public health, economic and social impact in Europe) wurde die belgische Covid-19-Epidemie im Hinblick auf die Auswirkungen der politischen Lockerungsmaßnahmen modelliert, die gemäß der stufenweisen belgischen Ausstiegsstrategie vorgesehen wurden (Coletti 2021).

Die epidemiologische Modellierung von Covid-19 variiert erheblich in ihrer Vorgehensweise und Zielsetzung. Im Rahmen des **BBC Pandemic Project**, das vom LSHTM, dem University College London und der University of Cambridge in Großbritannien kuratiert wurde, ist ein bundesweites Citizen-Science-Experiment durchgeführt worden, bei dem Freiwillige eine Smartphone-App ("BBC Pandemic") heruntergeladen haben und einen Tag lang ihre Bewegungs- und Kontaktdaten zur Verfügung gestellt haben. Damit wurden Daten zu sozialen Kontakten von mehr als 36.000 Personen gesammelt, die später von Modellierer_innen zur Entwicklung von wirksamen Instrumenten der britischen Regierung verwendet wurden. Dieses Modell wurde entwickelt, um die Wirksamkeit verschiedener politischer Maßnahmen zu untersuchen, die mittels sozialer Distanzierung die Kontakte der Bevölkerung begrenzen (z. B. Schulschließungen und Heimarbeit) (Klepac 2020; Kucharski 2020).

2.3 Beispiele im Themenfeld Klimawandelanpassung aus der Wissenschaft

Neben den bisher vorgestellten Modellierungsbeispielen zur Einschätzung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten aus der Praxis der Politikberatung sind in der wissenschaftlichen Literatur im Themenfeld der Klimawandelanpassung ebenfalls Modellierungsansätze zu finden, welche die Wirksamkeit analysieren. Die Suche wissenschaftlicher Literatur lag hierbei ausschließlich auf den quantitativen Modellierungsmethoden (siehe Methodenkapitel 3.3.3) und dem Themenfeld der Klimaanpassung. Hierfür erfolgten Suchabfragen über die SCOPUS unter der Verwendung folgender kombinierter Suchbegriffe: „*Climate*“ AND „*ADAPT*“ AND „*Modell*“ AND „*Policy*“ AND („*Simulation*“ OR „*Quantitative*“). Auch abgewandelte Abfragen wurden unternommen, um die Suche zu erweitern. Nach Prüfung des Titels blieben circa 100 relevante Veröffentlichungen übrig, deren Passfähigkeit über das Lesen von *Abstract* und *Summary* eingeschätzt wurde. Das Resultat der Recherche ergab, dass der Fokus der meisten Studien nicht darauf lag, die Wirksamkeit eines Politikinstrumentes oder Instrumentenmixes auf die Änderung des Akteursverhaltens zu bewerten. Die gefundenen Studien fokussierten eher

- a) auf die Wechselwirkungen in komplexen Prozessen und allgemeinen Empfehlungen von Politikstrategien mittels quantitativen Szenarien unter Verwendung von System Dynamics oder agentenbasierten Simulationen, jedoch nicht direkt auf die direkte Wirksamkeitsanalyse eines Politikinstrumentes oder eines Mixes von Instrumenten.
- b) auf die Auswirkung des Akteursverhaltens innerhalb komplexer Prozesse, in Verbindung mit der Anpassung an den Klimawandel über Verhaltenssimulationen, jedoch nicht auf die direkte Verhaltensänderung von Akteuren durch ein Politikinstrument oder eines Mixes von Politikinstrumenten.

Entsprechend analysieren die meisten der gefundenen wissenschaftlichen Studien Klimaanpassungsprozesse auf einer aggregierteren Analyseebene, ohne die Wirksamkeit von Politikinstrumenten direkt einzuschätzen oder zu bewerten. Zudem ist üblicherweise aus den Veröffentlichungen nicht ersichtlich, ob diese Studien die Implementation in den Prozess der Politikberatung erlangt haben.

Auffällig viele der in identifizierten Studien simulierten Klimaanpassungsprozesse wurden im Agrarbereich (Herrera 2019, Wens 2020, Candy 2015, Schrieks 2021) oder im Bereich des Wassermanagements (Kotir 2017, Mirzaei 2021, Prouty 2020, Xiang 2021, Wu 2022, Lord 2013, Al-Amin 2014, Giuliani 2016, de Ruig 2022) gefunden. Des Weiteren fokussieren sich wissenschaftliche Studien oft auf die Entwicklung neuer Methoden und Ansätze zur Modellierung von sozio-technischen Klimaanpassungsprozessen und Auswirkungen der Politik (Ulli-Beer 2010, Gerst 2013, Obracht-Prondzyska 2022, Siebers 2020), ohne ein spezifisches Beispiel der Klimaanpassung zu adressieren. Interessant ist ebenfalls, dass nahezu alle in der Recherche gefundenen Artikel jünger als 10 Jahre sind (ab dem Jahr 2012), die meisten sogar jünger als 5 Jahre (ab dem Jahr 2017). Dies zeigt, dass das Feld der Politikmodellierung noch in den Anfängen ist und zu den aufstrebenden Forschungsthemen gehört.

Modellierung komplexer Wirkungszusammenhänge

Die Modellierung von Wirkungszusammenhängen in komplexen Systemen bzw. Problemen der Klimaanpassung beruht meist auf Ansätzen der *System Dynamics*. Hier wird vorwiegend eingeschätzt, wie verschiedene Einflüsse die Dynamik eines Systems verändern. Zu diesen Einflüssen gehören auch Politikinstrumente, die meist finanzieller Natur sind. Die gefundenen Studien haben dabei nicht das Ziel, die Wirksamkeit von Politikinstrumenten explizit zu bewerten. Vielmehr geht es darum aufzuzeigen, wie Politikinstrumente wirken können und welche nicht-

linearen, evtl. unvorhergesehenen Dynamiken dies implizieren kann. Zwei ausgewählte Beispiele sollen dies im Folgenden kurz aufzeigen.

Moon et al. 2017 untersuchen in einem *System Dynamics* Modell, wie sich politisches Handeln auf die Risikominimierung von klimawandelbedingten Ereignissen wie Meeresspiegelanstieg, Starkregen und Hitzewellen im städtischen und ländlichen Raum bis zum Jahr 2050 in Südkorea auswirken. Die Auswirkungen des Klimarisikos wurden anhand der Kosten für die Wiederherstellung überschwemmter urbaner Gebiete und die Kosten für die Einfuhr von Nahrungsmitteln aufgrund einer geringeren landwirtschaftlichen Produktivität im ländlichen Raum abgebildet. Der Fokus liegt dabei auf der Interaktion von drei Faktoren: a) Die Kosten für die Beseitigung von Schäden durch Starkregenfälle, Hitzewellen und den Anstieg des Meeresspiegels, b) die Gesamtkosten für Lebensmittelimporte aufgrund des Rückgangs der Anbauflächen und der landwirtschaftlichen Produktivität sowie c) Änderungen im Staatshaushalt als Folge des Klimawandels. Zentrale Erkenntnisse der Studie sind: Erstens, dass die bisherigen Ausgaben Südkoreas für das Klimawandelbudget nicht ausreichend sind, um präventive Klimaanpassungsmaßnahmen umzusetzen, sondern nur um Schäden zu beseitigen. Zweitens, wenn die Regierung dieses Problem erkennt und das Budget frühzeitig aufstockt, scheint es nach den Simulationsergebnissen möglich, die Klimaschäden auf ein beherrschbares Maß zu begrenzen und die Reaktionsfähigkeit der Regierung zu erhalten. Drittens, bei Schwierigkeiten der Erhöhung des Klimabudgets scheint eine stärkere Aufstockung der urbanen Regionen kosteneffizienter als eine gleichverteilte Aufstockung zwischen ländlichem und urbanem Raum. Diese Studie zeigt entsprechend in Szenarien auf, wie sich politische Entscheidungen auf die Dynamik der Klimaanpassung und Klimafolgen auswirken. Es fehlt allerdings die Verbindung zur Politikberatung in der Veröffentlichung. Daher nehmen wir an, dass es sich um ein „akademisches“ Modell handelt, was Optionen aufzeigt ohne jedoch in der Politikberatung praktische Verwendung gefunden zu haben.

Candy et al. (2015) untersuchten in ihrer Studie die Resilienz von Lebensmittelsystemen und Versorgungssicherheiten im Klimawandel in Australien, ebenfalls auf Grundlage eines systemdynamischen Modells. Dabei wurde untersucht, wie Schocks und Stressoren die Dynamik des komplexen Lebensmittelsystems über mehrere Sektoren hinweg beeinflussen. Dabei wurde die Wirkung agrarpolitischer Maßnahmen für die Sektoren Flächennutzung, Pflanzenbau, Viehzucht, Fischerei, Lebensmittelverarbeitung, Transport, Lebensmittelabfälle und letztlich die Lebensmittelversorgung untersucht. Die Politikszenarien unterschieden sich im Hinblick auf den Zeitplan für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen, den Grad der staatlichen Beteiligung oder Regulierung im Lebensmittelsystem und den Umfang der Lösungen. Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass Australien im Business-As-Usual-Szenario (BAU) mit bisherigen Politikinstrumenten nicht in der Lage ist, einen heimischen Überschuss an Lebensmitteln zu halten. Insbesondere ist das derzeitige Lebensmittelsystem sehr anfällig für Einschränkungen bei der Ölversorgung. Eine erhöhte Nahrungsmittelproduktion scheint zudem einen drastischen Rückgang der kritischen Wasservorräte zu bewirken.

Verhaltensmodellierung

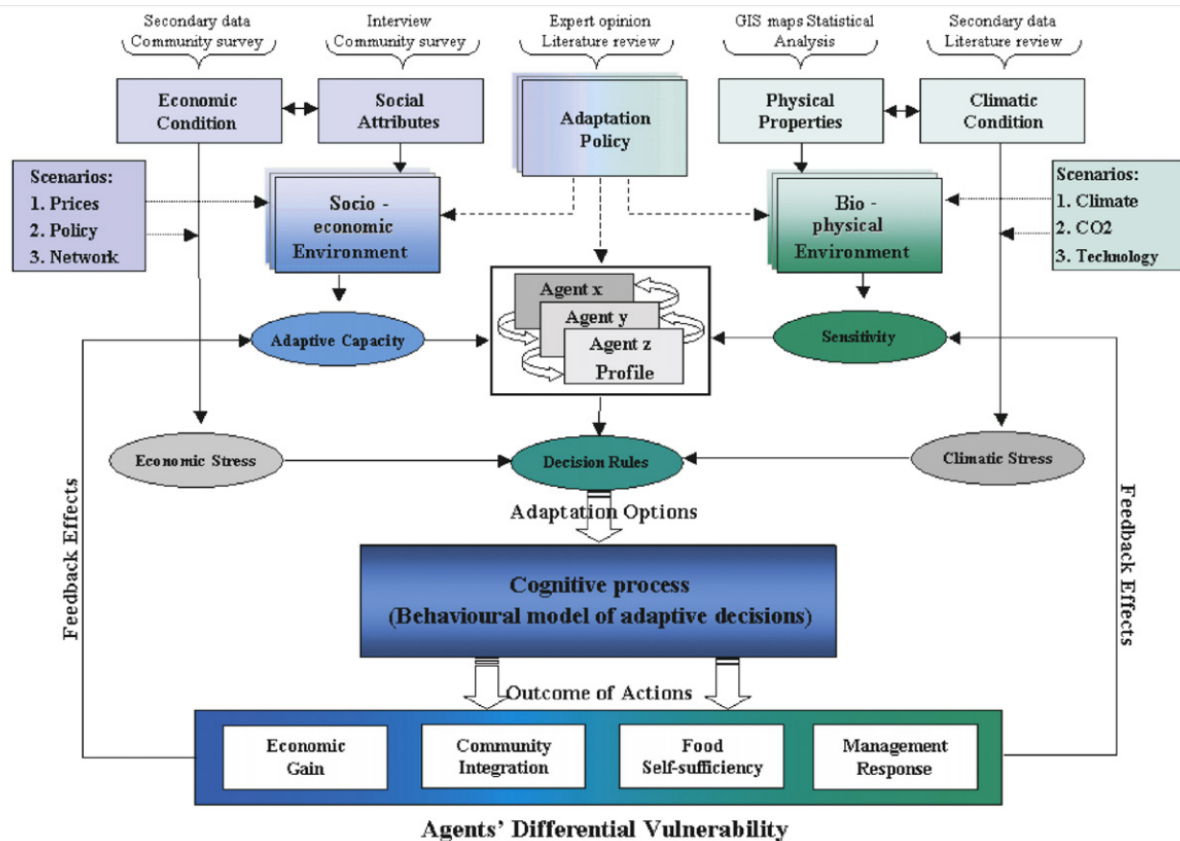
Die zwei zuvor vorgestellten Modellierungsbeispiele fokussierten primär darauf, die komplexen Systemzusammenhänge zu analysieren, in denen Politikinstrumente wirken. Die Verhaltensmodellierung versucht hingegen das komplexe Verhalten von Personen abzubilden. Dies erfolgt häufig mit der Methode der agentenbasierten Modellierung, aber auch mit systemdynamischen Ansätzen (Brown 2017). In dem *Review* von Brown et al. (2017) wurden Veröffentlichungen analysiert, die Verhaltensmodellierung (*behavioural modeling*) innerhalb der Themenfelder Klimaanpassung und -schutz implementieren. Es stellte sich heraus, dass Verhaltensmodellierung bisher vor allem in Modellierungen aus dem Agrarbereich genutzt wird.

Sie kritisierten, dass in Modellen die Abbildungen komplexer Verhaltensweisen und Entscheidungsprozessen fast gänzlich fehlen, obwohl sie für den Umgang mit dem Klimawandel sehr hohe Relevanz haben. Im Folgenden werden wir drei Modellbeispiele aus unserer Recherche vorstellen, die darstellen, wie Verhaltensmodellierung im Bereich der Politikmodellierung innerhalb des Themenfeldes der Klimawandelanpassung verwendet werden kann.

Krebs (2016) argumentiert, dass Klimawandelanpassung zu einem bedeutenden Anteil auf Verhaltensänderungen in Form von individueller Anpassungsaktivitäten beruht. Sie untersuchten den Einfluss von Nachbarschaftshilfe in Hitzewellen für ältere Menschen und den Einfluss der Intervention durch Informationskampagnen. Um die räumliche und zeitliche Dynamik sozialer Mobilisierung zu erfassen, wird ein agentenbasiertes Modell genutzt, das durch sozio-geographische Daten für die Stadt Kassel (Deutschland) quantifiziert wird und die Bevölkerung räumlich explizit nach soziologischen Lebensstilen gruppiert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Effekt der Mobilisierung zur Nachbarschaftshilfe erheblich gehemmt werden kann, wenn sich passive Gewohnheiten schneller etablieren als prosoziale Verhaltensweisen, die eine erfolgreiche soziale Koordination voraussetzen. Ein Simulationsszenario zeigt, dass jedoch eine zeitlich begrenzte Intervention in Form von Informationskampagnen ein vergrößertes zeitliches Fenster für die Stabilisierung von Nachbarschaftshilfen und deren Fortbestehen nach dem Ende der Intervention bieten kann. Auch in dieser Studie wird nicht direkt die Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf die Verhaltensänderungen der Akteure untersucht, sondern vorerst die Dynamik des Systems und wie diese Dynamik durch äußere Einflüsse, hier Interventionen, geändert werden kann. Dieser Ansatz wurde bei einer Vielzahl an Veröffentlichungen gefunden, sowohl in der Modellierung von Wirkungszusammenhängen als auch in der Modellierung von Verhaltensänderungen.

Acosta-Michlik und Espaldon (2008) gehören zu den Ersten, die agentenbasierte Modellierung anwenden, um das menschliche Anpassungsverhalten an den Klimawandel zu modellieren (Schrieks 2021). Sie untersuchen in ihrem agentenbasierten Modell die Anfälligkeit von Landwirten auf den Philippinen und deren Anpassungsverhalten zur Verringerung ihrer Anfälligkeit für zunehmende Dürren. Dabei wurden die Landwirte in vier landwirtschaftliche Typologien eingeteilt - traditionell, autark, diversifiziert und gewerblich. Diese unterscheiden sich stark in der Implementierung technischer Klimaanpassungsoptionen. Ihre Verhaltensmodule quantifizieren und validierten Acosta-Michlik und Espaldon durch Befragungen der Farmer zu ihrem Verhalten und Reaktionen auf Änderungen in der Politik und ermitteln Annahmequoten (adoption rates). Die für das Verständnis der Resultate der Verhaltensmodellierungen notwendige Beschreibung der Quantifizierung der Einflussgrößen wird in dieser Studie sehr gut dargestellt und durch Interviews, Experteneinschätzungen und Literaturrecherchen vervollständigt (siehe Abbildung 11). Insbesondere Geld- und Informationsmangel wurden als die wichtigsten Gründe für die Nichtanwendung verfügbarer technischen Anpassungsmaßnahmen identifiziert, vor allem bei traditionellen und autarken Farmern. Die Simulationen zeigten, dass Investitionen der Farmer in kostspielige Bewässerungssysteme, ohne die Gewährleistung eines wesentlich höheren Preises für Reis, die wirtschaftliche Situation der Landwirte nicht verbessern. Daher empfehlen sie, dass die Politik ein komplementäres Gesamtpaket von Anpassungsmaßnahmen umsetzt, die in ihrer Gesamtheit wirksam und nachhaltig sind. Zusammengefasst wurde in dieser Studie der Diffusionsprozess von soziotechnischen Innovationen untersucht, der generell bei der Verhaltensmodellierung und Modellierung komplexer Systeme zur Implementation und Annahme von Klimaanpassungsoptionen von zentraler Bedeutung ist.

Abbildung 11: Schema der Verhaltensmodellierung nach Acosta-Michlik und Espaldon (2008)



Quelle: aus der Studie von Acosta-Michlik und Espaldon (2008)

Mirzaei und Zibaei (2021) bewerten die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels und die Anpassungsstrategien für die Bewässerungswirtschaft und die Bewältigung von Konflikten zwischen den verschiedenen Wassernutzern anhand eines Flusseinzugsgebietes im Iran. Dazu kombinieren sie ein ökonomisch-hydrologisches Optimierungsmodell mit einem agentenbasierten Verhaltensmodell. Das Verhaltensmodell simuliert das Kooperationsverhalten der Farmer bei der Flusswasserentnahme. Kooperation wirkt sich dabei positiv auf die Erhaltung des Feuchtgebietes aus. Sozialer Druck zählt neben staatlichen Maßnahmen zu den Faktoren, die die Kooperation der Wassernutzer am stärksten beeinflussen. Die Autoren folgern aus den Simulationen, dass die Annahme geeigneter Anpassungsstrategien die Auswirkungen des Klimawandels abschwächen und mehr Wasser für die Wiederherstellung des Jazmourian-Feuchtgebietes zur Verfügung stehen würde. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass das Beharrungsvermögen im individuellen Verhalten der Landwirte die Anpassung des Agrarsektors verlangsamt, so dass die Umsetzung von Anpassungsstrategien nur zu einem um 14 % geringeren Wasserverbrauch führte.

2.4 Fazit

Die vorgestellten Studien stellen das umfangreiche Anwendungsspektrum qualitativer bis quantitativer Modellierungsansätze komplexer Systeme bzw. Prozesse mit unterschiedlichsten Formen der Abbildung des Akteursverhaltens dar, um die Auswirkungen von politischen Instrumenten zu veranschaulichen. Wesentlichste Erkenntnis der Recherche von Modellierungsbeispielen ist, dass die Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten und -maßnahmen in solchen komplexen und sozialen Modellierungen bisher nur in Grundzügen stattfindet. Die Praxisbeispiele und wissenschaftlichen Beispiele fokussieren hingegen

vorwiegend auf der Abbildung der komplexen sozio-technischen Prozesse von problematischen Dynamiken in der Gesellschaft. Auf dieser Systemabbildung aufbauend wird geprüft, welche Änderungen in dem System zur Änderung des Verhaltens hin zur gewünschten Entwicklung führen. Politische Rahmenbedingungen sind dabei von zentraler Bedeutung und deren Wirkungen auf das System werden analysiert. Eine direkte Analyse der **Wirksamkeit** von Politikinstrumenten in solchen Systemen im Sinne einer Politikberatung ist jedoch nur bei den wenigsten Anwendungsbeispielen erkennbar und fehlt vor allem bei den wissenschaftlichen Modellierungsbeispielen zur Klimawandelanpassung. Auch die Verhaltensmodellierung ist oft nur vereinfacht mit Ad-hoc-Ansätzen abgebildet oder anhand des rein rational handelnden Individuums (Schrieke 2021).

Ebenso erkennbar ist, dass die meisten Modelle sich nicht auf eine Modellierungsmethode beschränken, sondern entweder neben einer Kernmethode noch weitere, unterstützende Methoden nutzen oder direkt aus Kombinationen von Modellierungsmethoden aufgebaut sind.

Auffällig ist zudem, dass die meisten Modelle sektoral entwickelt werden, d. h. für ein Politikfeld. Gerade das Themenfeld der Klimaanpassung ist jedoch ein Gebiet mit sektorübergreifenden Problemstellungen und Lösungsoptionen. Das im Juni 2022 gestartete EU-Forschungsprojekt **KNOWING** unter Leitung des *Austrian Institute of Technology* (AIT) widmet sich genau dieser Herausforderung und entwickelt ein holistisches *System Dynamics* Modell, in dem die Wechselwirkung zwischen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen in verschiedenen Sektoren (1. Hitze und Gesundheit, 2. Landwirtschaft und Bodenfruchtbarkeit, 3. Hochwasser und Infrastruktur) in Beispielregionen analysiert werden sollen. Hier liegt der Fokus auf der Kombination von Anpassungsmaßnahmen und deren gleichzeitigem Einfluss auf den Klimaschutz. Zur Erstellung des Modells wird, wie das *System Dynamics* Modellen häufig umgesetzt, das unterschiedliche Systemverständnis der relevanten Stakeholder aus verschiedenen Bereichen und Expertisen mit eingebunden (AIT: Projekt KNOWING).

Dies ist insofern interessant, als dass sich die verwendeten Modellierungsmethoden neben der Analyse sehr umfassender Problemstellungen ebenso zur Beantwortung spezifischerer Fragen, in denen konkret die Wirksamkeit von Politikinstrumenten bewertet werden soll, eignen. In unserer Literaturrecherche fanden wir jedoch nur wenige dieser Art von Modellen. Das kann mehrere Gründe haben:

1. Die vorgestellten Modellierungsmethoden werden in der Politikberatung oft in umfassenden Vorhaben und Fragestellungen für die Erstellung („großer“) Modelle genutzt („*Big Picture*“) und nicht für spezifischere Teil-Fragestellungen der Wirksamkeit eines Politikinstrumentes bzw. eines Mixes an Instrumenten.
2. Wir hatten nur Zugang zu Modellen, die in grauer oder wissenschaftlicher Form veröffentlicht wurden. Modelle, die einer Geheimhaltung unterliegen oder in einem Beratungsprozess nebenbei mit genutzt werden, sind üblicherweise in einer solchen Recherche nicht auffindbar. Beispiele hierfür sind Kompetenzen und Modelle von häufig auch in der Bundespolitik engagierten Unternehmens- und Strategieberatungsfirmen, wie u. a. McKinsey & Company oder PricewaterhouseCoopers.
3. Das Feld der Modellierung komplexer Systeme und Fragestellungen stellt bisher immer noch eher eine Nische dar, sowohl im Modellierungsumfeld als auch in der Politikberatung. Dies wird daran deutlich, dass gefundene relevante wissenschaftliche Veröffentlichungen und Praxisbeispiele selten älter als 10 Jahre (vor 2012) sind.
4. Damit einhergehend, dass es sich hierbei um ein vergleichsweise junges Untersuchungsfeld handelt, ist die Verwendung solcher Modellierungsarten in der Politikberatung noch nicht etabliert. Die Einbindung komplexer Modellierungen oder Verhaltensmodellierungen in

Entscheidungsprozesse der Politik scheint nach den Rechercheeinschätzungen bisher auf wenige Länder und Regionen beschränkt zu sein.

5. Für die Quantifizierung solcher Modelle zur Abbildung komplexer gesellschaftlicher Probleme sind oft sozialwissenschaftliche bzw. hochaufgelöste sozialräumliche Daten notwendig, deren Erhebung durch die Datenschutzrechte beschränkt wird. Politische Maßnahmen, die das Verhalten der Bevölkerung (indirekt) beeinflussen, können aus gesellschaftlicher Sicht kritisch betrachtet werden. Zu den Bedenken auf individueller Ebene gehören die Achtung der Menschenwürde, Autonomie (Freiheit von Fremdbeeinflussung, Authentizität und Selbstwirksamkeit) und Gleichheit. Auf der gesamtgesellschaftlichen Ebene umfassen solche Bedenken die potentielle Verletzung der demokratischen Grundprinzipien und des transparenten staatlichen Handelns (wenn die Bürger_innen nicht vollständig nachvollziehen können, auf welcher Datenbasis, in welcher Form und Handlungssequenz sowie nach welchen Entscheidungskriterien sie aktuell zu Entscheidungen oder Beeinflussungsversuchen herangezogen werden) sowie die Gefahr von Machtasymmetrien (von Grafenstein 2018).

Wie groß der Einfluss dieser Punkte ist, konnte in der vorliegenden Studie nicht eingeschätzt werden. Sicher ist jedoch, dass die Komplexität von politischen Entscheidungsprozessen zunimmt und somit auch der Bedarf, diese mit ihrem nicht-linearen dynamischen Verhalten und Nebeneffekten möglichst genau abbilden zu können. Modellierungen komplexer, sozialer Systeme können hier einen entscheidenden Beitrag liefern. Trotz aller Limitierungen dieser Modellierungsansätze, sollte hinterfragt werden, ob die etablierten Entscheidungsprozesse in der Politik diese Komplexität gut genug berücksichtigen oder ob genau die Modellierungen komplexer, sozialer Systeme diese Beratungslücke im Ex-ante-Bereich füllen kann. Die vielseitigen Chancen und Limitierungen der vorgestellten Modellierungsmethoden sind in Kapitel 4.2 detaillierter beschrieben.

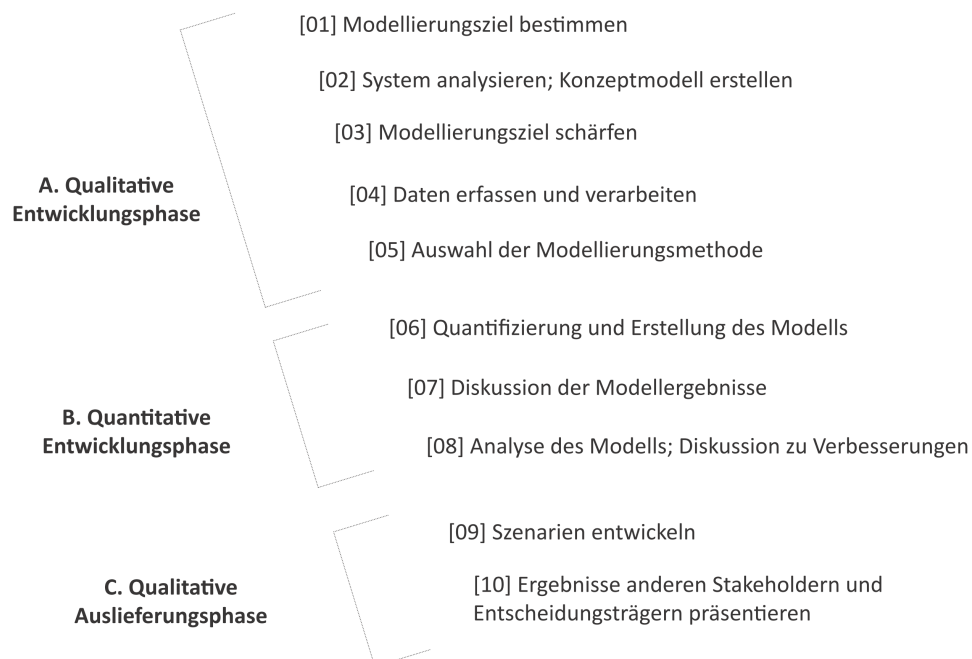
3 Modellierungsmethoden zur Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten

3.1 Qualitative, semi-quantitative oder quantitative Modellierung

Die Unterscheidung zwischen qualitativen und quantitativen Modellierungsmethoden ist in der Praxis häufig ambivalent. Eine Modellierungsmethode kann nämlich entweder qualitativ oder quantitativ betrachtet werden, entweder auf der Grundlage der Eingabedaten (Modellkomponenten) oder der Ausgabedaten (was das Modell als Ergebnisse übermittelt). Hierbei ist zu betonen, dass eine Übereinstimmung zwischen der Dateneingabe und der vom Modell dargestellten Ergebnisse nicht unbedingt erforderlich ist – quantitative Eingangsdaten können qualitative Ergebnisse liefern und umgekehrt. (Badham 2015).

Die Schnittstelle zwischen qualitativen und quantitativen Methoden kann auch bezüglich der Stufen des gesamten Modellierungsprozesses betrachtet werden. Die qualitative, konzeptionelle Modellentwicklung lässt sich in die quantitative Modellgestaltung und in die Computersimulation überführen. Quantitative Analysen können wiederum in qualitative Interpretationen umgewandelt werden, zum Beispiel in vereinfachte Visualisierungen und Beschreibungen, die für die Darstellung von Modellergebnissen und deren Umsetzung in Politik und Praxis wichtig sind (Voinov 2018). Dabei kann es bei den Übergängen zwischen den qualitativen und quantitativen Modellierungsphasen zu Problemen kommen: etwa, wenn komplexe quantitative Modelle von einem Expertenteam intern erarbeitet werden und anschließend den Entscheidungsträger_innen vorgestellt werden, die von den Informationen ohne Modellkenntnis überfordert sind (Voinov 2018). In Abbildung 12 wird erläutert, wie die qualitativen und quantitativen Phasen im Modellierungsprozess ineinander greifen.

Abbildung 12: Abgrenzung zwischen qualitativen und quantitativen Phasen der Modellentwicklung für die Politikberatung



Quelle: nach Voinov (2018)

Qualitative und quantitative Phasen der Modellierung werden je nach Fortschritt des politischen Prozesses entsprechend der Aufgabenstellung ineinander übergeleitet. In der Anfangsphase der Modellentwicklung ermöglichen qualitative Methoden die Analyse und Konzeptualisierung des vorhandenen Problems und bereiten die notwendigen Daten und die Basis für den anschließenden Übergang zur numerischen, quantitativen Phase vor.

In der letzten Phase ermöglichen qualitative Modellierungstechniken die Aufbereitung der quantitativen Ergebnisse von Modellen und Simulationen in der für die Praxis am besten geeigneten Form.

Im vorliegenden Bericht werden wir die Methoden nach ihrer Funktion in quantitativ und qualitativ einteilen, wobei die qualitativen Methoden diejenigen sind, die eine qualitative Abbildung eines Systems ermöglichen, ohne die Zusammenhänge und Variablen zu quantifizieren (Schwerpunkt auf der Systemstruktur und qualitativen Verständnis). Die quantitativen Methoden sind diejenigen, die das dynamische Verhalten des Systems/Prozesses mittels dynamischer Simulation oder stochastischen Analysen abbilden, wofür das Modell mit Daten quantifiziert worden sein muss.

3.2 Keine einheitliche Taxonomie der Methoden

Die Forschung im Bereich der Modellierung weist auf die Unmöglichkeit einer vollständigen, standardisierten Katalogisierung von Modellierungsmethoden und -techniken hin: aufgrund der unterschiedlichen disziplinären Zugänge zur Modellierung (z. B. naturwissenschaftlich, sozialwissenschaftlich, verschiedene *Communities* der Modellierungsszene) gibt es keine einheitliche Klassifizierung von Modellierungsmethoden, keine einheitliche Terminologie für die verschiedenen Modelltypen und ihre Eigenschaften sowie kein einheitliches Verfahren zum Testen der Anwendbarkeit verschiedener Modellierungsmethoden für unterschiedliche Modellierungsaufgaben (Adelle 2012a; Ritchey 2012; Voinov 2018; Badham 2015).

Es ist auch wichtig zu betonen, dass kein idealer Algorithmus entwickelt werden kann, um „das beste“ Modellierungstool für jede Problem- und Fragestellung zu finden, sondern dass bei der Entscheidung über die passende(n) Methode(n) flexibel entschieden werden muss.

In der Praxis ist es nicht realistisch, dass eine Methode die beste für ein bestimmtes Politikmodell ist. Stattdessen kann es sein, dass eine oder mehrere Methoden zur Analyse eines spezifischen Problems notwendig sind. Politikberater_innen müssen in die Auswahl der passfähigsten Methoden bei der detaillierten Problemanalyse einbezogen werden, um zu verstehen, welche Aspekte des Systems durch die jeweilige Modellierungsmethode ein- und ausgeschlossen werden (Badham 2015).

Kelly et al. (2013) haben einen in der Wissenschaft viel zitierten Versuch unternommen, einen Entscheidungsbaum als Orientierungshilfe für die Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethode zu erstellen. Ihr Entscheidungsbaum berücksichtigt die räumlichen und zeitlichen Skalen, den Einsatz von qualitativen Daten, die Einschätzung der Unsicherheit und den Zweck, für den das Modell entwickelt werden soll. Diese Studie beschränkt sich allerdings auf die Betrachtung von nur fünf breit angelegten Ansätzen, die stark vereinfacht und in ihrer durchschnittlichen und standardisierten Form betrachtet werden. Die Autorin dieses Entscheidungsbaums weist außerdem darauf hin, dass bei der Entscheidung über eine Vorgehensweise für eine neue Problemstellung auch weitere Ansätze in Betracht gezogen werden sollten, einschließlich hybrider Formen (d. h. gekoppelte Komponentenmodelle), die eine Vielzahl von Ansätzen zur Wissensintegration nutzen.

Die für die jeweilige Fragestellung gewählten Modellierungsmethoden können a priori nicht richtig oder falsch sein, allerdings können sie mehr oder weniger geeignet sein. Ihre Passfähigkeit kann nach verschiedenen Kriterien beurteilt werden. Zum Beispiel Voinov (2018) hat als Kriterien für die Evaluierung der Auswahl von Methoden folgende Kriterien vorgeschlagen: (1) Effektivität (wie erfolgreich kann eine bestimmte Methode angesichts des Schwerpunktproblems sein und wie gut wird sie den Zielen und Bedürfnissen gerecht); (2) Effizienz (ob die Methode in der benötigten Zeit und mit dem angemessenen Umfang der verfügbaren personellen, finanziellen und technischen Ressourcen die Ziele erreichen kann); (3) Sozialer Mehrwert (wie gut unterstützen die Methoden die allgemeinen Ziele, wie z. B. die Förderung der Geschlechtergerechtigkeit, die Diversität und Einkommensgleichheit, der Bildung und des Dialogs zwischen verschiedenen Gruppen).

Die Systematisierung der Methoden im vorliegenden Bericht basiert auf dem angepassten Vorschlag von Voinov (2018). Im Laufe des Experteninterviews mit dem Autor dieser Typologie (Juni 2022) wurden auch Ergänzungen und Aktualisierungen berücksichtigt.

Im Weiteren werden die wesentlichen Methoden mit dem Anwendungsfokus der Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten auf Akteure kurz beschrieben. Hierbei liegt der Fokus auf den grundsätzlichen Methoden (sogenannten Basismethoden), auf denen viele weitere Modellierungsansätze aufbauen. Zum Beispiel kann das bekannte Predictive Modeling (prädiktive Analyse oder auch Vorhersagemodellierung) auf Regressionsanalysen, auf System Dynamics (SD), auf agentenbasierter Modellierung (ABM), der empirischen Modellierung (EM) oder einer Kombination dieser Basismethoden basieren. Die Beschreibung der empirischen Modellierung als sehr umfassende Methode fokussiert wiederum speziell auf Ansätze des Maschinellen Lernens bzw. der Künstlichen Intelligenz, da generelle Data Analytics-Ansätze, wie zum Beispiel lineare Regressionsanalysen, in vielen Verfahren als Grundlage dienen.

3.3 Beschreibung der Methoden

3.3.1 Qualitative Modellierungsmethoden

Qualitative Modellierungsmethoden werden auch als Konzeptualisierungsmethoden bezeichnet. (Voinov 2018; Badham 2010). Qualitative Methoden sind sogenannte *soft methods*, die jedoch aufgrund Ihrer Unschärfe nicht als primitiv angesehen werden. Sie haben sich bei der politischen Entscheidungsfindung erfolgreich bewährt, sowohl als eigenständige als auch als komplementäre oder unterstützende Methoden. Qualitative Methoden werden verwendet:

- ▶ um die Struktur eines komplexen Problems oder System möglichst ganzheitlich zu erfassen (Hintergrund: Die Systemstruktur induziert das Systemverhalten)
- ▶ um die Beziehungen zwischen den verschiedenen Komponenten eines Problems bzw. Systems zu bestimmen und zu erfassen
- ▶ um verschiedene inter- und transdisziplinäre Zugänge zum besseren Systemverständnis in das qualitative Modell zu integrieren
- ▶ um das mentale Modell von Stakeholdern, Akteuren und Politikern durch Einbindung in den Modellierungsprozess zu verbessern
- ▶ um die Systemstruktur für evtl. nachfolgende quantitative Modellierungen zu erarbeiten
- ▶ um die quantitative Modellierungsergebnisse verständlicher für Stakeholder, Akteure und Politiker aufzubereiten

In diesem Teil gehen wir näher auf (1) die Beschreibung des Paradigmas des Systemdenkens ein sowie auf die dazugehörigen qualitativen Methoden: (2) Konzeptkarten (*Concept Mapping*) und (3) Ursache-Wirkungsdiagramme (*Causal Loop Diagram*).

3.3.1.1 Systemdenken (System Thinking)

Das Paradigma des Systemdenkens ist grundsätzlich die Antithese zum linearen Denken. Statt einer linearen, einfachen Kausalkette (z. B.: Die Schließung von Kohlekraftwerken wird die Treibhausgasemissionen reduzieren.) bindet das Systemdenken andere Faktoren und nicht-lineare Beziehungen in die Analyse mit ein (z. B.: Die Schließung von Kohlekraftwerken wird zu einem ungedeckten Energiebedarf führen, was wiederum den Import von Strom aus Nachbarländern erhöht, der eventuell auch aus Kohlekraftwerken resultiert und so die Treibhausgasemissionen nur auf nationaler Ebene reduziert). Bei dieser Methode ist die Identifikation von Rückkopplungsschleifen („*Feedback loops*“) zentral, die entweder einen immer weiter verstärkenden Einfluss oder einen ausgleichenden Einfluss aufzeigen können.

Die Methoden dieser Gruppe ermöglichen eine schnelle Strukturierung und Visualisierung von Kausalbeziehungen rund um eine zentrale Problemstellung in einem komplexen System. Sie variieren von qualitativen Verfahren wie dem Kausaldiagramm („*Causal Loop Diagram*“) und „*Concept Mapping*“ bis hin zu quantitativen Verfahren wie „*Fuzzy Cognitive Mapping*“ (mehr dazu im Abschnitt über die semi-quantitativen Methoden). Systemdenken dient auch als Grundlage für die Entwicklung komplexer Simulationen mittels der *System Dynamics* Methode (siehe quantitative Methoden: System Dynamics).

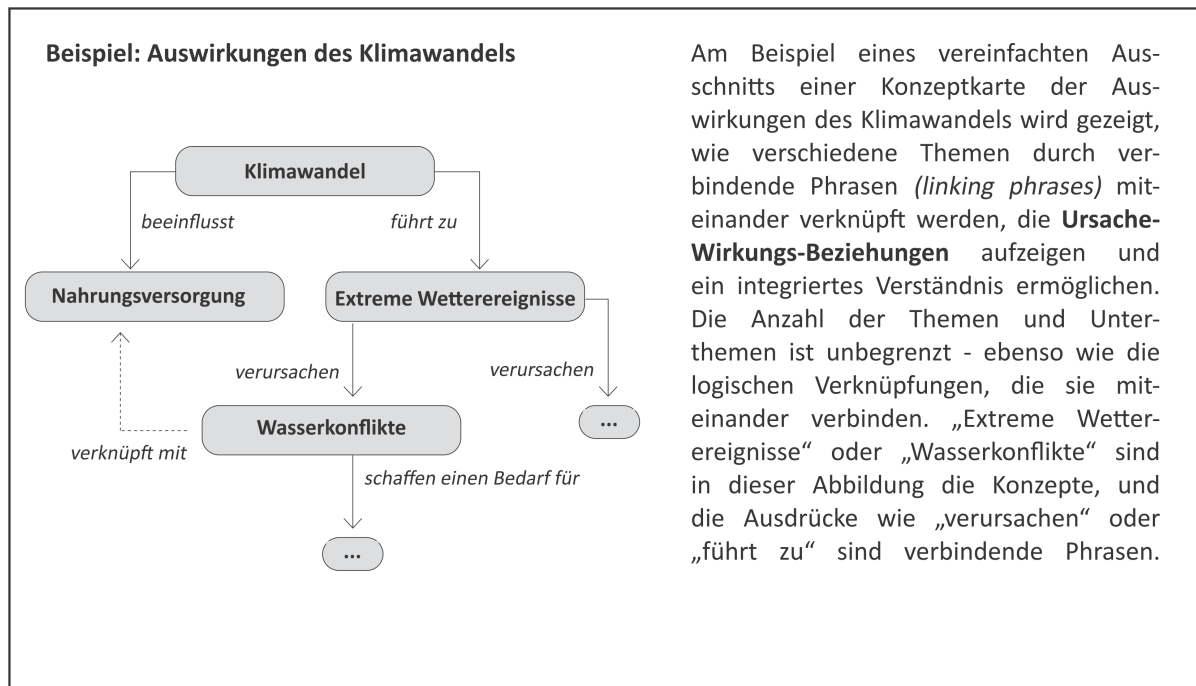
Systemdenken bildet die Zusammenhänge ab, die Aufschluss darüber geben, wie sich die Veränderung eines Faktors auf die anderen auswirken kann. Mit dieser Methode lassen sich die Auswirkungen der zu treffenden politischen Maßnahmen in einem "Was-Wäre-Wenn"-Szenario vorhersagen und Synergien sowie nichtintendierte Nebeneffekte aufzeigen. Ein umfassendes Verständnis des komplexen Systems oder Prozesses wird durch Einbindung verschiedener Akteure und deren Systemverständnis (mentales Modell) sowie Literatur- und Datenrecherche erreicht. Entsprechend ermöglicht diese Methode komplexe Themen sektorübergreifend zu betrachten und Wissen aus allen Bereichen zentral in einem visualisierten Kausaldiagramm zu sammeln.

Ein wichtiger einschränkender Faktor der Verfahren aus dieser Kategorie ist die Unmöglichkeit einer statistischen Überprüfbarkeit - in ihrer reinen Form sind die Methoden aus dieser Gruppe eher qualitativ.

3.3.1.2 Konzeptkarte (Concept Mapping)

Concept mapping ist eine Modellierungsmethode zur konzeptuellen Anordnung und visuellen Darstellung der Beziehungen zwischen den Teilen eines komplexen Systems. Durch die Fokussierung auf ein zentrales Problem, wie z. B. die Wirksamkeit einer politischen Maßnahme auf eine Zielgruppe, ermöglicht es diese Methode, alle (un-)offensichtlichen Faktoren zu identifizieren, die miteinander verbunden sind und diese Frage beeinflussen. *Concept maps* gehören zusammen mit den *Mind maps* (stark vereinfacht in der Struktur) zu den *Cognitive maps*, die das Ziel haben, das mentale Modell (also das individuelle Systemverständnis) einer oder mehrerer Personen zu visualisieren.

Abbildung 13: Visuelle Darstellung der Methode: Konzeptkarte (Concept Mapping)



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- ▶ **Link zu anderen Methoden:** Fuzzy Cognitive Mapping (Erweiterung der Methode: Zuweisung eines quantitativen Einflusses einer Variable auf andere Variable).
- ▶ **Eingaben:** Bezeichnete Konzepte¹ und die Verbindungen mit Erläuterungen, die diese Konzepte verknüpfen und deren Zusammenhänge erläutern. Zusätzlich können konkrete Beispiele von Ereignissen oder Objekten hinzugefügt werden, die helfen, die Bedeutung eines bestimmten Konzepts zu verdeutlichen.
- ▶ **Ausgaben:** Diagrammatische Visualisierung der Struktur eines Systems. Netzwerk, in dem Konzepte durch gerichtete Verbindungen miteinander verbunden sind. Die erstellten Konzeptkarten (*Concept Maps*) ermöglichen es auch, Querverbindungen zu erkennen, die Zusammenhänge in verschiedenen Wissensbereichen aufweisen und dadurch nicht offensichtliche neue Erkenntnisse vermitteln.
- ▶ **Anwendungen:** Ermöglicht die Modellierung von Beziehungen zwischen Konzepten und Faktoren, die (noch) keiner detaillierten Beschreibung bedürfen. Modelliert Systeme, bei denen es keine oder nur eine begrenzte wissenschaftliche oder statistische Datenbasis gibt, aber Expert_innen- und/oder Praxiswissen vorhanden ist. Bedeutsam sind die Einfachheit und das schnelle Verfahren, mit denen ein Modell erstellt werden kann, indem viele verschiedene Wissensquellen und -bereiche kombiniert werden (Ozesmi 2004). Sie können auch in digitaler Form erstellt werden (Badham 2015), was mehr Möglichkeiten für die Analyse eröffnet und eine Übertragung in den Bereich der quantitativen Modellierung zulässt.
- ▶ **Limitierungen:** Stützt sich ganz auf das Expertenwissen und deren mentale Modelle. Das Unwissen, die falschen Vorstellungen und die Voreingenommenheit der Expert_innen sind alle in den Maps enthalten. Es liefert keine statistischen Tests und kann keine komplexen logischen Beziehungen zwischen Systemkomponenten beschreiben. Darüber hinaus ist es

¹ **Konzept** ist ein wahrgenommenes Muster in Ereignissen oder Objekten, dass mit einer Bezeichnung gekennzeichnet ist. Die Bezeichnung für die meisten Konzepte ist ein Wort (Novak 2006).

aufgrund des fehlenden Zeitbezugs nicht möglich, das dynamische Verhalten des Systems zu modellieren. Der erste Nachteil kann jedoch teilweise durch die Einbeziehung weiterer Expert_innen überwunden werden.

► Verwandte Methoden:

Cognitive mapping (Eden & Ackermann 2004): Die Konzepte und die Beziehungen zwischen diesen sind von der Wahrnehmung des Systems durch eine Einzelperson bestimmt, während das *Concept Mapping* die Wahrnehmungen zahlreicher Menschen berücksichtigt und so ein breiteres (und damit zuverlässigeres) Meinungsbild ermöglicht.

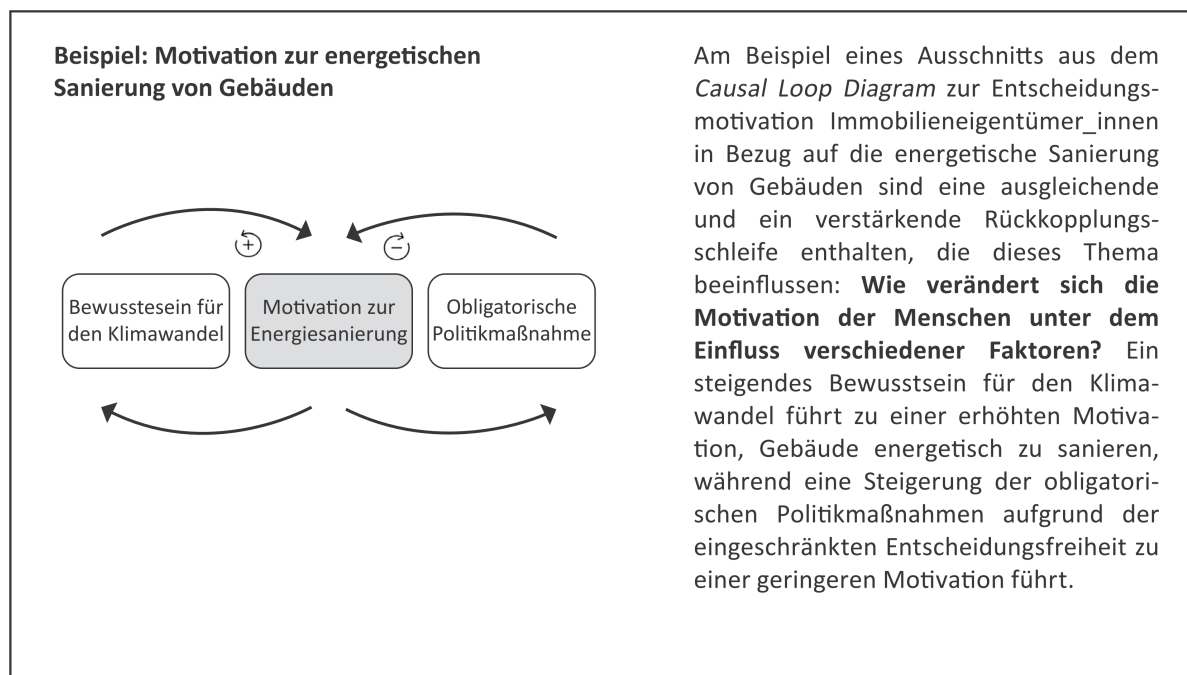
Mind mapping (Davies 2011; Badham 2010): Ordnet und vernetzt ebenfalls die Teile des Systems, verwendet aber eine gezieltere Einteilung der Konzepte, wobei das Hauptthema im Mittelpunkt steht und alle anderen Konzepte, die für dieses Thema relevant sind, radial auf verschiedenen Unterebenen verzweigt sind. *Concept Mapping* hingegen benötigt keine klare Reihenfolge der Konzepte, sondern befasst sich mit dem Verhältnis zwischen denen und wie das Zusammenspiel letztlich die zentrale Frage beeinflusst.

► **Weiterführende Literatur:** Trochim (2005); Novak (2006); Davies (2011); Praktisches Beispiel: Trochim (2004).

3.3.1.3 Kausaldiagramm (Causal Loop Diagram)

Causal Loop Diagram ist eine Methode zur Darstellung der Rückkopplungsstruktur eines komplexen Systems. Diese Methode ermöglicht eine schnelle Strukturierung und Abbildung von Kausalbeziehungen rund um eine zentrale Modellierungsfrage. Dabei fokussiert diese Methode auf die Identifikation von verstärkenden und ausgleichenden Rückkopplungsschleifen (Feedback Loops), die das nicht-lineare Verhalten eines komplexen Systems verursachen.

Abbildung 14: Visuelle Darstellung der Methode: Kausaldiagramm (Causal Loop Diagram)



Quelle: angepasst von Schünemann (2021)

- ▶ **Link zu anderen Methoden:** *System Dynamics* (Erweiterung der Methode: Bereitstellung von Parametern, Anfangswerten und Formeln für die Beziehungen zwischen den Variablen. Das Ergebnis ist ein quantifiziertes System Dynamics Simulationsmodell, welches das dynamische Verhalten des komplexen Systems abbilden kann).
- ▶ **Eingaben:** Systemkomponenten, die sich im Laufe der Zeit verändern und das zentrale modellierte Problem beeinflussen. Verbindungspfeile zwischen denen, die auf Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Variablen und wichtige Feedback-Loops hinweisen.
- ▶ **Ausgaben:** Diagrammatische Visualisierung von Zusammenhängen innerhalb der Struktur eines Systems
- ▶ **Anwendungen:** Schnelles Erfassen der Ursachen dynamischer Prozesse; Erkennen und Erfassen der mentalen Modelle von Experten; Vermittlung der wichtigen Rückkopplungen, die hypothetisch für das Problem verantwortlich sind (Sterman 2002). Die Identifizierung und Klassifizierung der stärksten Feedback-Loops kann einen Einblick in das Verhalten des Systems ohne quantitative Angaben geben (Badham 2010). Zur Erstellung eines Kausaldiagramm gemeinsam mit Expert_innen wird die partizipative Gruppenmodellierung (Group Model Building) genutzt, in der das Vorgehen in Skripten/Anleitungen für Workshops erprobt ist (Hovmand 2014).
- ▶ **Limitierungen:** beruht auf (fehlerhaften) mentalen Modellen von Expert_innen (siehe Methode *Concept Mapping*) oder auf evtl. unzureichender Recherche. Die Kombination der Einbindung einer Vielzahl von Expert_innen und dazu eine umfangreiche Recherche der Einflüsse in der Literatur kann diese Limitierung deutlich verringern.
- ▶ **Weiterführende Literatur:** Binder (2004).

3.3.2 Semi-quantitative Modellierung

Die Abgrenzung zwischen qualitativen und quantitativen Methoden ist nicht immer eindeutig. Quantitative Methoden stützen sich oft auf Berechnungen, die zum Teil auf qualitativen oder halbquantitativen Daten beruhen (z. B. numerische Schätzungen von Werten, die nicht statistisch abgeleitet sind; oder Schätzungen, die auf experimentellen Daten beruhen, aber mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind) (Voinov 2018).

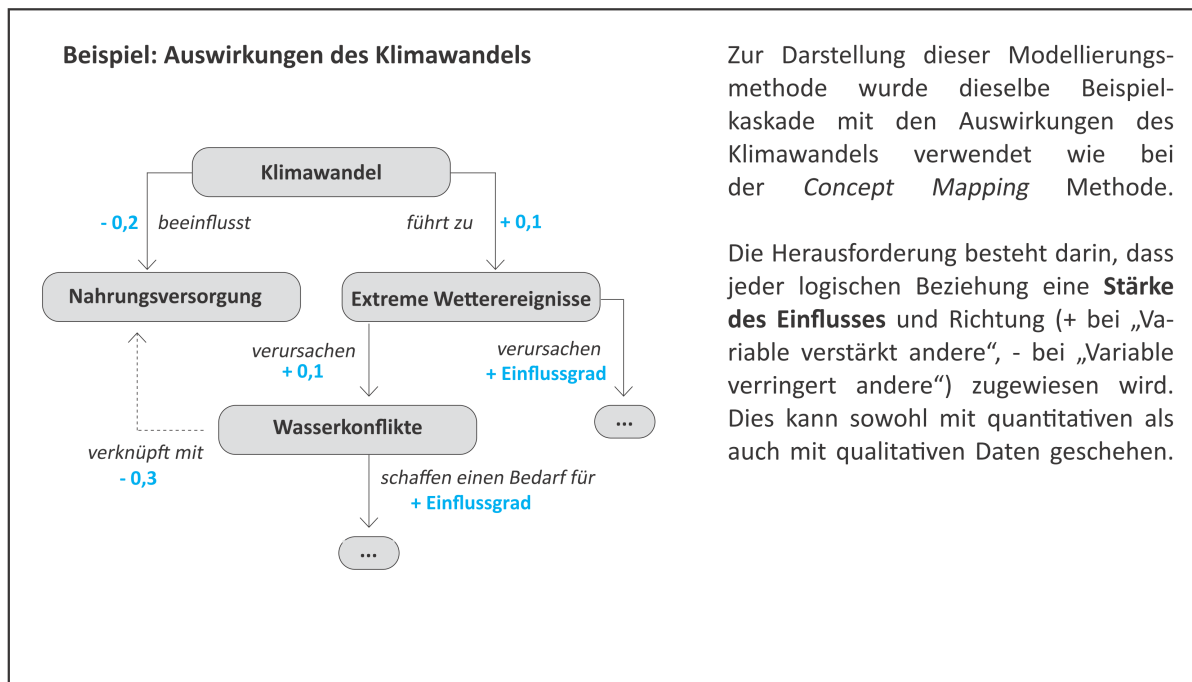
In diesem Unterkapitel geht es um die Verfahren, bei denen die Grenzen zwischen qualitativ und quantitativ beweglich sind. Bei den meisten in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren handelt es sich um übergreifende Methodologien, bei denen das Verhältnis zwischen numerischen und qualitativen Komponenten sehr vielfältig sein kann.

Die folgenden semi-quantitativen Methoden werden im Folgenden näher erläutert: (1) *Fuzzy Cognitive Mapping* in Fortführung des Systemdenken-Ansatzes, (2) Soziale Netzwerkanalyse, (3) Szenarienentwicklung und (4) Entscheidungsorientierte Modellierung.

3.3.2.1 Fuzzy Cognitive Mapping (FCM)

Fuzzy Cognitive Mapping ist eine Erweiterung des *Concept Mapping*, bei dem die Stärke des Einflusses einer Variable auf eine andere Variable bewertet wird. Dieses Verfahren wird als semi-quantitativ eingestuft, da es zwar numerische Bewertungen des Einflussgrades zwischen den Variablen vornimmt, diese aber vorwiegend nur qualitativ bestimmt werden.

Abbildung 15: Visuelle Darstellung der Methode: Fuzzy Cognitive Mapping (FCM)



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- ▶ **Link zu anderen Methoden:** *Concept Mapping* (vereinfachte Version)
- ▶ **Eingaben:** Knoten, die Konzepte darstellen, Verbindungen, die die Beziehungen zwischen diesen Konzepten abbilden und - als Erweiterung des Concept Mappings - die Zuweisung des Einflussgrades (entweder positiv oder negativ und Stärke des Einflusses), den eine Variable auf eine andere ausübt.
- ▶ **Ausgaben:** Diagrammatische Visualisierung der Struktur eines Systems mit parametrisierten Beziehungen zwischen seinen Bestandteilen.
- ▶ **Nutzungsphase:** Konzeptentwicklung, Hypothesenbildung und Datenauswertung
- ▶ **Anwendungen:** Es lässt sich einfach erstellen und verlangt kein Expertenwissen in jedem Bereich, sondern kann auf der Grundlage einfacherer Beobachtungen erarbeitet werden (Özesmi 2004). Diese Methode liefert zusätzliche Überzeugungen, Erkenntnisse und Konzepte zu einer bestimmten Modellierungsfrage. Darüber hinaus werden auch die Zusammenhänge und Abhängigkeiten dieser Konzepte sichtbar, die Aufschluss darüber geben, wie sich die Veränderung eines Faktors auf die anderen auswirken kann (Kokkinos 2018). Diese Methode adressiert das Problem der mangelnden quantitativen Daten, da die qualitativen und quantitativen Informationen, die sie enthält, aus Expertenmeinungen gewonnen werden. Obwohl es keine quantitativen Analysen bietet, ermöglicht diese Methode eine erklärende Modellierung von Systemveränderungen infolge von Veränderungen bei einzelnen Faktoren. Mit dieser Methode lassen sich die Auswirkungen der zu treffenden politischen Maßnahmen in einem "Was-Wäre-Wenn"-Szenario vorhersagen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die reale Welt komplex ist und Wissen aus den Wahrnehmungen der Menschen abgeleitet werden kann, die an einer bestimmten Frage beteiligt sind (Kokkinos 2018).
- ▶ **Limitierungen:** Die Schätzungen des Einflusses zwischen den Verbindungen sind abstrakt und teilweise schwer zu wichten, die Methode stellt keinen Ersatz für statistische Verfahren

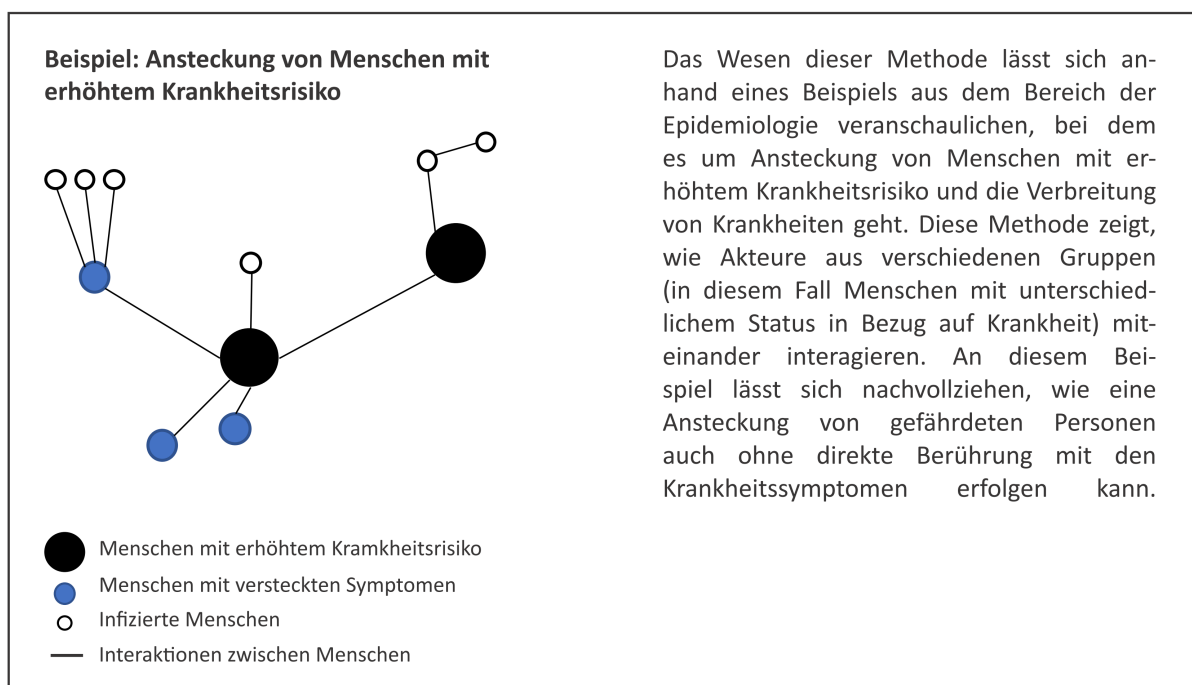
dar und bietet keine Schätzungen von Realwertparametern oder statistischen Tests (Özesmi 2004).

- **Weiterführende Literatur:** Jetter (2006); Papageorgiou (2012); Özesmi (2004).

3.3.2.2 Soziale Netzwerkanalyse (Social Network Analysis)

Soziale Netzwerkanalyse (SNA) ist sowohl eine theoretische Sicht auf die Art und Weise, wie die Interaktionen einzelner Akteure oder Akteursgruppen die sozialen Strukturen einer Gemeinschaft bilden, als auch eine Reihe von Analysewerkzeugen, um diese Interaktionen und sozialen Strukturen als Netzwerke aus Knoten (Akteure) und Verbindungen (Beziehungen zwischen den Akteuren) zu analysieren (Dempwolf 2012). Es beantwortet die Frage, welche Rolle die soziale Struktur im System spielt und verdeutlicht die Verbindungen zwischen Individuen, welche ein System zusammenstellen (Badham 2010). Diese Modellierungsmethode gilt als semi-quantitativ, da es einerseits die bestehende Beziehungsstruktur qualitativ beschreiben kann, aber andererseits dessen Analyseverfahren auf mathematisch-stochastischen Gleichungen aus der Graphentheorie beruhen und somit Vergleiche zwischen Akteuren oder Gruppen innerhalb des Netzwerks ermöglichen. Daten aus Social Media - häufig auch als soziale Netzwerke strukturiert - können, müssen aber jedoch nicht Input dieser Methoden sein.

Abbildung 16: Visuelle Darstellung der Methode: Soziale Netzwerkanalyse



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

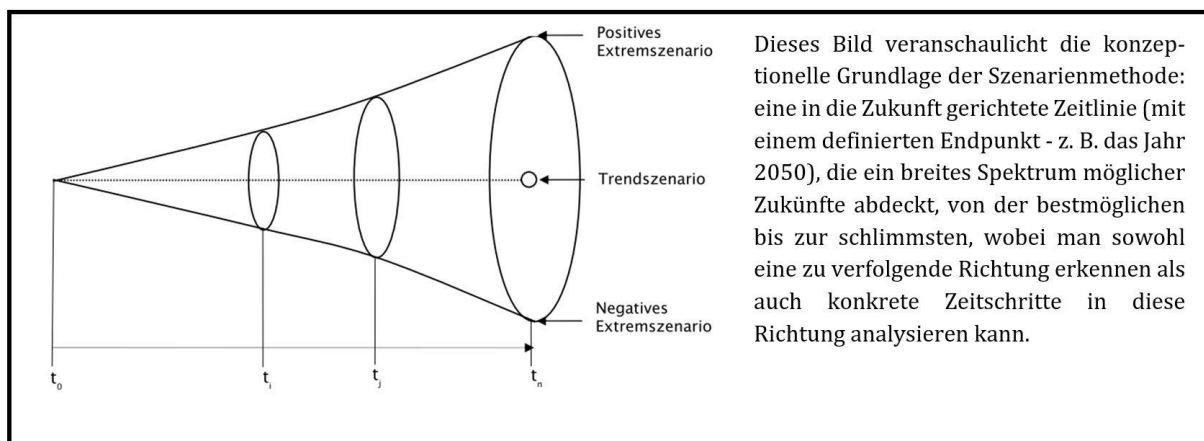
- **Eingaben:** Knoten (Akteure oder Akteursgruppen) und Verbindungen zwischen ihnen (Beziehungen).
"Akteure" können einzelne Personen oder soziale Einheiten wie z. B. Organisationen oder sogar Länder sein. „Soziale Beziehungen“ können Kategorien wie Freundschaft, Kommunikation oder Vertrauen darstellen oder sich auf andere Arten von Verbindungen wie Mitgliedschaft, Handel oder verschiedene Arten von Ressourcen beziehen.
- **Ausgaben:** Darstellung der sozialen Beziehungsstruktur innerhalb eines Systems sowie evtl. stochastische Auswertung der Beziehungen.

- **Nutzungsphase:** Es kann sowohl als Grundlage für die weitere komplexe agentenbasierte Modellierung dienen als auch als eigenständige Modellierung, wenn der Einfluss sozialer Interaktionen auf das Endergebnis der Fragestellung eine bedeutsame Rolle spielt.
- **Anwendungen:** SNA kann die Erfolgchancen einer gesellschaftlichen Innovationsakzeptanz steigern, da die Betrachtung nicht mehr auf einzelne Individuen, sondern auf miteinander verbundene Akteure gerichtet ist. Diese Modellierungsmethode ist besonders geeignet für: a) die Identifizierung von sozialen Netzwerkstrukturen (bestehende, fehlende, mögliche und realistische Beziehungen) und Erkennung von Akteuren und Netzwerkgrenzen, b) entdecken, wo und wie die strukturellen Bedingungen Innovationen und Entwicklungsprozesse ermöglichen und wo und wie die Koordination optimiert werden und c) die Identifizierung der Stärken und Schwächen des Wissenstransfers innerhalb eines Modellierungssystems und Förderung der Anpassungsmotivation (Kolleck 2013).
- **Limitierungen:** Die meisten Beziehungen werden als stark/schwach und nicht gewichtet beschrieben, aber gleichzeitig sind die Analysetechniken in diesem Fall weniger in der Lage, mit den gewichteten Verbindungen umzugehen.
- **Weiterführende Literatur:** Kolleck (2013); Dempwolf (2012).

3.3.2.3 Szenarienentwicklung

Szenarienentwicklung stützt sich auf eine umfassende Analyse von Trends und politischen Maßnahmen, um eine Reihe von *plausiblen Zukünften* abzudecken - sie unterscheidet sich von der Vorhersage einer bestimmten Zukunft. Jedes Szenario soll sich deutlich von anderen Szenarien unterscheiden und eine einzigartige mögliche Zukunft aufzeigen (Voinov 2018).

Abbildung 17: Visuelle Darstellung der Methode: Szenarienentwicklung

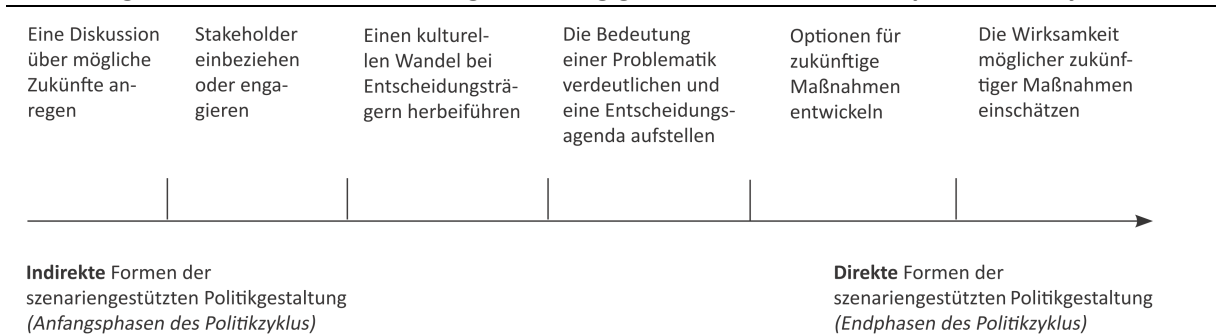


Quelle: Mietzner (2009)

- **Anwendungen:** Szenarien können aus quantitativen Modellen (z. B. Systems Dynamics) entstehen, wenn ein quantitatives Modell für mehrere Randbedingungen simuliert wird und die Ergebnisse dann qualitativ in Form von "*Szenario-Narrativen*" beschrieben werden können. Sie können auch *qualitativ modelliert* werden (narrativ im Sinne eines partizipativen Prozesses). Entscheidungsträger_innen können Veränderungen im externen Umfeld besser einschätzen und die Wahrnehmung bestehender oder entstehender Probleme verfeinern. Die Szenarienentwicklung muss auf einem fundierten Verständnis des politischen Milieus beruhen, in dem man Entscheidungen trifft. In Abbildung 18 sind die möglichen Rollen der

Szenariomodellierung in Abhängigkeit von der Phase des politischen Zyklus dargestellt (siehe Einleitung: Modellierungsfunktionen).

Abbildung 18: Szenarienmodellierung in Abhängigkeit von der Phase des politischen Zyklus



Quelle: nach Volkery (2009)

Indirekte Formen der szenarienbasierten Politikberatung beziehen sich auf die frühen Phasen der Politikgestaltung. Hier bietet sich die Gelegenheit für eine breitere Beteiligung von gesellschaftlichen Akteuren und offene Diskussionen. Eine größere Wissensbasis hilft dabei, politisch relevante Themen zu identifizieren und zu formulieren. Darüber hinaus kann die Szenarienplanung einen risikofreien Raum bieten, in dem verschiedene Strategien visualisiert, ausprobiert und auf ihre Akzeptanz hin geprüft werden können, ohne dass sie den Beschränkungen der tatsächlichen Umsetzung unterworfen sind. Eine breite Beteiligung verbessert die Aussagekraft und Legitimität von Szenarien.

In der Phase der Politikplanung und -umsetzung hat die Szenarienentwicklung eine andere Funktion. Aufgrund von Zeit- und Ressourcenknappheit benötigen Entscheidungsträger_innen konkrete Hinweise und operative Unterstützung, ohne dabei die Grenzen der Zukunftsgestaltung zu vergessen. Diese direkten Formen der Szenarienentwicklung erfordern gezieltere Informationen und Erkenntnisse über die zu entwickelnden Strategien, die ungünstigere Alternativen ausschließen und sich auf die vorteilhaften Möglichkeiten konzentrieren. Außerdem sind die Chancen für eine breit angelegte Einbeziehung gesellschaftlicher Stakeholder begrenzt, da die Wahl zwischen Politikalternativen letztlich ein höchst politisierter Prozess ist (Volkery 2009).

- **Limitierungen:** Szenarien untersuchen mögliche Zukünfte, können aber ohne Kombination mit anderen Methoden alleine keine quantitativen Vorhersagen machen.
- **Weiterführende Literatur:** Volkery (2009); Mietzner (2009); EEA (2009).

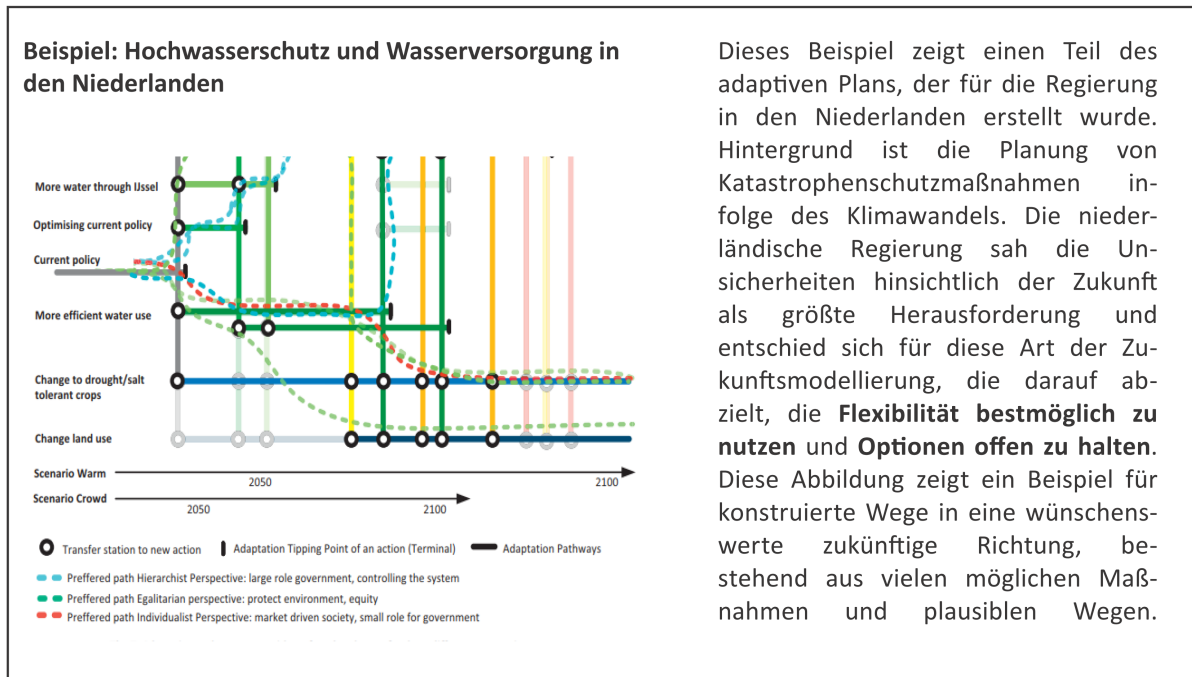
3.3.2.4 Entscheidungsorientierte Modellierung (*Decision-focused structuring*)

Entscheidungsorientierte Modellierung ist ein Oberbegriff für entscheidungsbezogene Strukturierungs- und Modellierungsmethoden, die sich auf die Abfolge von Entscheidungen und die damit verbundenen zeitlich aufeinanderfolgenden Systemveränderungen konzentrieren sowie auf deren Auswirkungen auf die Endergebnisse. Die qualitative Modellierung kann dazu dienen, sowohl eine Struktur als auch eine genaue Zeitplanung zu berücksichtigen. Sie kann auch in die semi-quantitative oder sogar vollständig quantitative Modellierung übertragen werden.

Die **Dynamic Adaptive Policy Pathways** ist eine für die Politikgestaltung relevante Methode, die sich auf die Konzepte des dynamischen Wandels und der Anpassung von Maßnahmen konzentriert (Haasnoot 2013). Wie bei den Entscheidungsbäumen kann diese Methode bei der

qualitativen Modellierung nützlich sein, um sowohl Struktur als auch eine explizite Berücksichtigung des Timings zu bieten. Sie kann auch in die semi-quantitative oder vollständig quantitative Modellierung übernommen werden.

Abbildung 19: Visuelle Darstellung der Methode: Entscheidungsorientierte Modellierung



Quelle: Haasnot (2013)

- **Eingaben:** Mögliche künftige Entscheidungen und Ereignisse mit Zeitpunkt, an dem diese geschehen.
- **Ausgaben:** Ein Leitfaden mit einer Reihe von Maßnahmen, bei denen die Unsicherheit der Zukunft berücksichtigt ist, um das gewünschte Ziel zu erreichen.
- **Anwendungen:** Wird als Planungsinstrument in der Politikgestaltung eingesetzt, z. B. in Form von „Adaptation Pathways“: eine Modellierungsmethode, die alternative Routen aufzeigt, um denselben gewünschten Punkt in der Zukunft zu erreichen. Es unterstützt die Entscheidung über künftige Maßnahmen, indem es die Ungewissheit explizit macht und Entscheidungen mit den gewünschten Ergebnissen verknüpft. Dynamische adaptive Pläne (*Dynamic adaptive plans*) werden für die Wasserbewirtschaftung in New York, Neuseeland und der Rhein-Mündung erstellt und wurden auch für die Themse-Mündung entwickelt (Haasnoot 2013).
- **Limitierungen:** Diese Gruppe von Methoden ist eher zur Planung geeignet, da sie nicht in der Lage ist, die Zukunft dynamisch zu simulieren und Vorhersagen darüber zu treffen.
- **Weiterführende Literatur:** Haasnoot (2013).

3.3.3 Quantitative Modellierung

Quantitative Modellierungsmethoden basieren auf Formeln und Gleichungen, um die Beziehungen zwischen den Systemkomponenten quantitativ zu beschreiben. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Ansätze:

- a) die stochastische Beschreibung eines Systems mit Angabe von Wahrscheinlichkeiten, mit denen die relevanten Zielgrößen auftreten, bedingt durch vorherige Ereignisse mit Wahrscheinlichkeitsverteilung.
- b) die zeitaufgelöste Simulation des Computermodells, welche das dynamische Verhalten des Systems und der relevanten Zielgrößen beschreibt. Hierfür müssen alle Variablen und Beziehungen ausreichend gut quantifiziert werden, damit sie ein gutes Abbild der Realität wiedergeben.

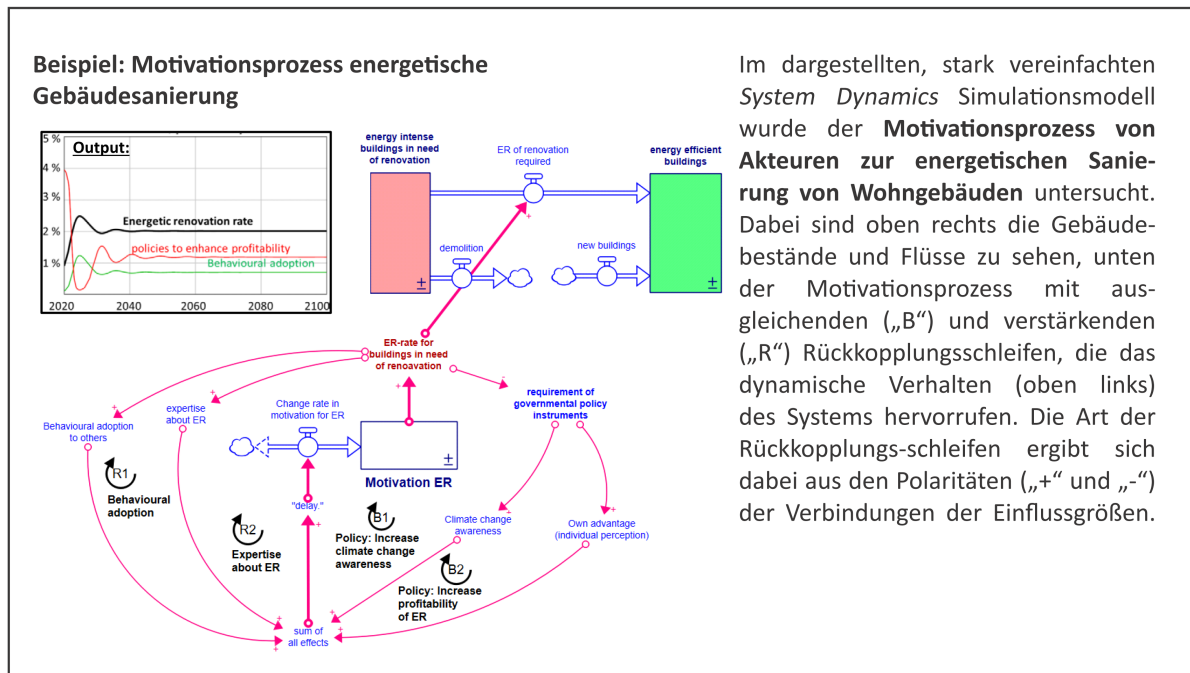
Die größte Herausforderung der quantitativen Modellierung ist, die benötigten Daten zur Quantifizierung in ausreichender Qualität zu bekommen. Eine weitere Herausforderung ist es, die Ergebnisse der quantitativen Modelle an externe, nicht am Modellierungsprozess beteiligte Stakeholder und Akteure zu vermitteln. Zu beiden Herausforderungen gibt es verschiedene Lösungsvorschläge, die im Weiteren ausführlicher erläutert werden.

Generell lassen sich die quantitativen Modellierungen und v. a. die Computersimulationen in zwei Kategorien unterteilen. *Top-Down* ist eine aggregierte, das heißt das System als Ganzes beschreibender Ansatz, das sich auf Systemverhalten konzentriert, ohne dabei das Verhalten einzelner Akteure genauer zu betrachten. *System Dynamics* ist eine Methode, die hier verwandt wird. Der gegensätzliche Ansatz hierzu ist *Bottom-Up*, in dem sich das Systemverhalten aus der Interaktion einzelner Akteure oder Akteursgruppen ergibt. Die agentenbasierte Modellierung nutzt diesen detaillierteren Betrachtungsansatz. Im Weiteren werden die wesentlichen quantitativen Methoden mit dem Anwendungsfokus der Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten auf Akteure kurz beschrieben.

3.3.3.1 System Dynamics

System Dynamics ist eine Methode zur Modellierung und dynamischen Simulation komplexer Systeme, Prozesse und Probleme. Der Fokus liegt hierbei darauf aufzuzeigen, wie sich verschiedenen Größen/Variablen eines Systems oder Prozesses (durch Verbindungen) beeinflussen. Von zentraler Bedeutung sind die dabei entstehenden Rückkopplungen, die einen verstärkenden oder ausgleichenden Effekt auf das System haben können. System Dynamics Simulationsmodelle sind daher üblicherweise nicht linear, was komplexe Systeme üblicherweise auch nicht sind (Stermann 2002). Diese Betrachtungsweise ist geeignet, nicht-intendierte Nebeneffekte aufzuzeigen, ein tiefes Systemverständnis zu erlangen und entsprechend Lösungsansätze zur gewünschten Verhaltensänderung zu ermitteln. Es versteht sich daher als Gegensatz zum klassischen linearen Denkansatz in Entscheidungsprozessen. Zur Erstellung eines hochwertigen System Dynamics Modells ist es wichtig, das Systemverständnis (mentale Modelle (Ford 1999)) verschiedener Akteure mit einzubinden. Hierfür eignen sich Ansätze der partizipativen Modellierung (z. B. „Group Model Building“ (Vennix 1996, Scott 2018), in denen Stakeholder und/oder Akteure im gesamten Modellierungsprozess mit involviert werden. Auf diesem Weg wird auch das Vertrauen in das Modell erhöht und so dessen Verwendung in Entscheidungs- oder Politikprozesse deutlich gesteigert (Hovmand 2014).

Abbildung 20: Visuelle Darstellung der Methode: System Dynamics (nach Schünemann 2021)



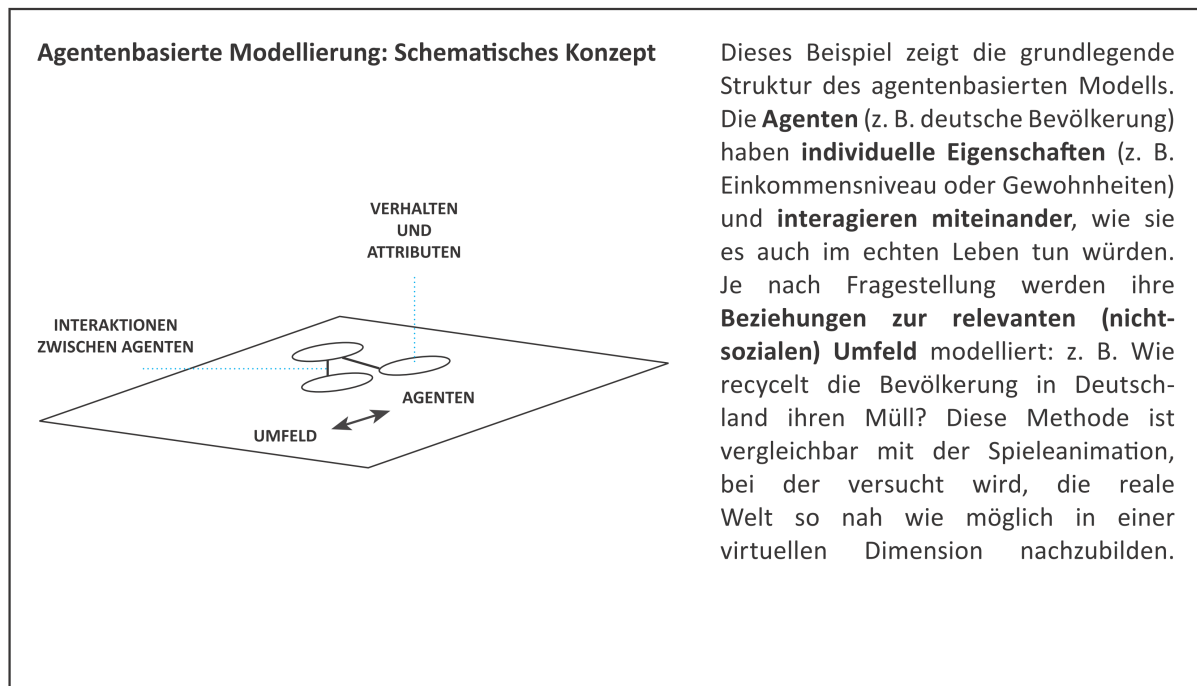
Quelle: angepasst von Schünemann (2021)

- ▶ **Link zu anderen Methoden:** *System Thinking*, Kausaldiagramm (*Causal Loop Diagram*)
- ▶ **Eingabe:** Modellstruktur, die auf Beständen (*Stocks*, z. B. Bestände an Wissen, Menschen, Geld), Zu- und Abflüssen (*Flows*) zur Bestandveränderung und Verbindungen (*Connectors*) zwischen ihnen basiert. Eine valide Quantifizierung der Modellstruktur ist essentiell und stellt hohe Ansprüche an das Vorhandensein ausreichender Daten.
- ▶ **Ausgaben:** Zeitliche Entwicklung des Systemverhaltens und der Ausgabegröße in der Zukunft (nutzbar in Verbindung mit Szenarienanalyse)
- ▶ **Anwendungen:** Erhöhen des Verständnisses von Entscheidungen auf die Dynamik von komplexen Systemen, u. a. für politische Entscheidungsträger_innen; Erkennen nicht-intendierter Nebeneffekte von Instrumenten und Maßnahmen auf das Systemverhalten; Verknüpfung verschiedener sektoraler Betrachtungen (z. B. Umwelt und Wirtschaft)
- ▶ **Limitierungen:** Qualität des *System Dynamics* Modell stark abhängig von der erfassten Systemstruktur (d. h. vom Systemverständnis der an der Modellentwicklung beteiligten Akteure) und der vorhandenen Datengrundlage zur Quantifizierung des Modells
- ▶ **Weiterführende Literatur:** Sterman (2002); Ford (1999); Hovmand (2014); Scott (2018)

3.3.3.2 Agentenbasierte Modellierung

Die Agentenbasierte Modellierung (ABM) ist eine Methode zur Simulation der sozialen Interaktionen innerhalb komplexer Systeme, mit der das dynamische Verhalten von Agenten (Menschengruppen, Lebewesen, bewegliche Objekte) unter dem Einfluss wechselnder Faktoren abgeschätzt werden kann.

Abbildung 21: Visuelle Darstellung der Methode: Agentenbasierte Modellierung



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

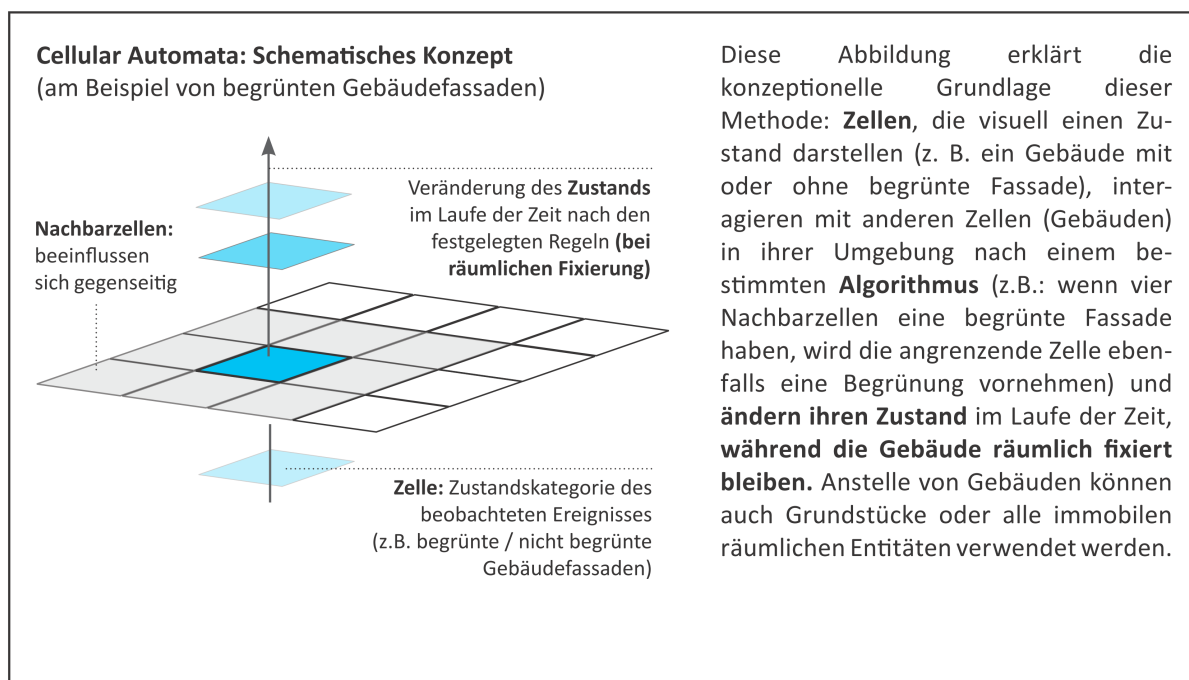
- **auch bekannt als:** *agent-based simulation, agent-based simulation modelling, multi-agent simulation/multi-agent systems, multi-agent-based simulation, agent-based social simulation, individual-based configuration modelling,*
- **Eingaben:**
 1. Agenten: Virtuelle Repräsentationen von Menschen, Tieren oder anderen beweglichen Objekten.
Manchmal gehen einige Modelle über die Abbildung menschlicher Agenten hinaus und können auch physische Objekte (wie Fahrzeuge oder Institutionen) als Agenten darstellen. Dieser Prozess der Abbildung von Nicht-Individuen als Agenten wird als Agentification bezeichnet (Hare 2004).
Regeln für das Aggregieren und die Verteilung von Agenten: Agenten können sowohl Einzelpersonen als auch Gruppen von Menschen (z. B. Haushalte) sein. Die Auswahl, Attributzuweisung und Verteilung der Agenten in dem zu modellierenden System sollte möglichst genau das Bild der realen Welt widerspiegeln und mit der Modellierungsfrage übereinstimmen.
 2. Raum, mit der die Agenten interagieren: Das kann entweder eine konkrete Landfläche oder eine abstrakte Umgebung sein.
 3. Theoretische Grundlage des Agentenverhaltens: In der Regel besteht aus soziologischen und psychologischen Theorien oder aus Teilbereichen der Spieltheorie. Eine simplifizierte Lösung mit festen Verhaltensweisen der Agenten ist ebenfalls möglich, kann aber die Komplexität der realen Welt nicht vollständig widerspiegeln.
 4. Regeln für die soziale Interaktion: welche Agenten mit welchen interagieren können und wie sie es tun.
- **Ausgaben:** Simulation, die das Systemverhalten im Zeitverlauf beschreibt und die komplexe soziale Interaktion von Individuen widerspiegelt.

- **Anwendungen:** ABM eignet sich besonders gut für die Modellierung dezentraler, autonomer Entscheidungsfindung, in dem sich das dynamische (oft nicht-lineare) Systemverhalten (emergent) aus dem Verhalten der Agenten ergibt.
- **Limitierungen:** Eine Vielzahl von Daten zur Beschreibung der Interaktionen wird benötigt: Detaillierte Daten über die Verteilung von relevanten Verhaltensweisen und Verbindungen innerhalb des Systems, sowie aggregierte Systemdaten für die Modellkalibrierung (Badham 2010).
- **Weiterführende Literatur:** Benenson (2004); Clarke (2003); Crooks (2008)

3.3.3.3 Zelluläre Automaten (*Cellular Automata*)

Cellular Automata (CA) ist eine Methode zur Modellierung von *Zustandsänderungen* in einer bestimmten *räumlichen Umgebung*.

Abbildung 22: Visuelle Darstellung der Methode: Zelluläre Automaten (*Cellular Automata*)



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- **Eingaben:** Zellen, die einen Objekt und Prozess im System abstrakt darstellen (z. B. die aktive oder passive Landnutzung) und in einem Gitterfeld angeordnet sind. Jede Zelle ist räumlich unbeweglich, ändert aber ihren Zustand bei jedem Zeitschritt/Modellschritt nach den im Modell festgelegten Regeln.
- **Ausgaben:** Simulation von Veränderungen im Zustand des räumlichen Systems nach vorgegebenen Regeln
- **Anwendungen:** Ermöglicht quantitative Prognosen, bezieht räumliche und dynamische Komponenten ein und lässt sich leicht mit anderen Modellierungstechniken integrieren. Diese Methode kann dabei helfen, die Koordination zwischen den Regionen und Institutionen zu verbessern, die durch Planungs- und Managementmaßnahmen eine räumlich integrierte Entwicklung mit einer langfristigen Perspektive anstreben (Guzman 2020).

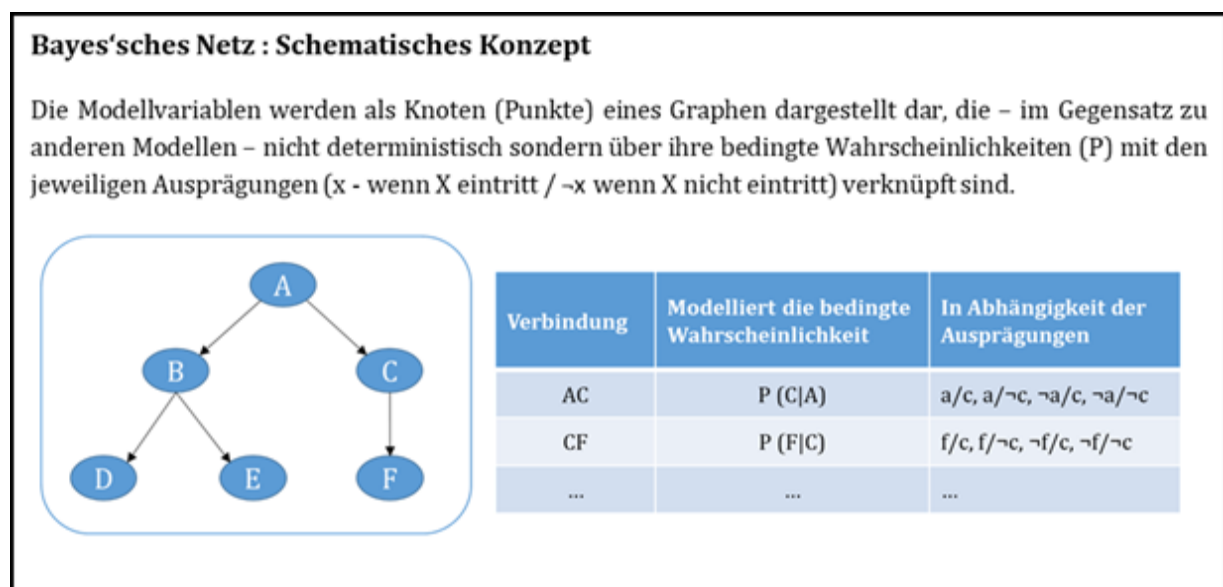
Diese Methode wird häufig zur Modellierung von Landnutzungsänderungen und im Verkehrssektor verwendet. CA-Modelle werden auch zur Simulation vielfältiger städtischer Phänomene verwendet - zum Beispiel Stadtwachstum und Zersiedelung - sowie zur Bewertung der Verteilung von Bevölkerung und Dienstleistungen, zur Analyse des Verkehrsflusses und zur Modellierung des Wettbewerbs um Standorte (Guzman 2020).

- **Limitierungen:** Ähnlich wie bei der ABM-Methode ist auch hier die Herausforderung, die Daten für die Interaktion zwischen den Zellen in ausreichender Qualität zu generieren, um das detaillierte Systemverhalten zu beschreiben.
- **Weiterführende Literatur:** Tobler (1979); Torrens (2006); White (1993)

3.3.3.4 Bayessche Netze (*Bayesian Networks, Belief networks*)

Bayes'sche Netze (benannt nach dem Mathematiker und Statistiker Thomas Bayes) stellen im Gegensatz zu anderen Modellen die Beziehungen zwischen den Modellvariablen nicht deterministisch, sondern probabilistisch (mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintretend) dar. Die Variablen werden als sogenannte Knoten eines Graphen dargestellt. Die bedingten Abhängigkeiten zwischen den Modellvariablen werden über die Verbindungen/Kanten/Pfeile im Graphen beschrieben. Im Zusammenhang mit der Politikmodellierung können so komplexe Zusammenhänge und Abhängigkeiten eines Systems beschreiben und modelliert werden, die zudem noch mit allgegenwärtigen und realitätsnahen Unsicherheiten (beispielsweise von Umfragen, Expertenmeinungen, Klimaprognosen) versehen werden können. Allerdings können Bayes'sche Netze, die wahrheitsbasierte Interaktionen zwischen Individuen repräsentieren, auch als ABM interpretiert werden (Lehikoinen 2013). Obwohl über Bayes'sche Netze sehr gut Komplexität und unsicheres oder mangelhaftes Wissen über eine bestimmte Domäne repräsentiert und modelliert werden können, werden sie in der Praxis häufig noch unterschätzt und vergleichsweise wenig eingesetzt (Kuikka 2014). Dies ist vermutlich mit ihrem nicht ganz trivialen Aufbau und dem auf den ersten Blick nicht intuitiven Verständnis zu erklären. Ein wichtiger Vorteil ist, dass - da alle Zusammenhänge probabilistisch modelliert sind - auch die Ergebnisse Angaben eine Vorhersageunsicherheit enthalten.

Abbildung 23: Visuelle Darstellung der Methode: Bayessche Netze



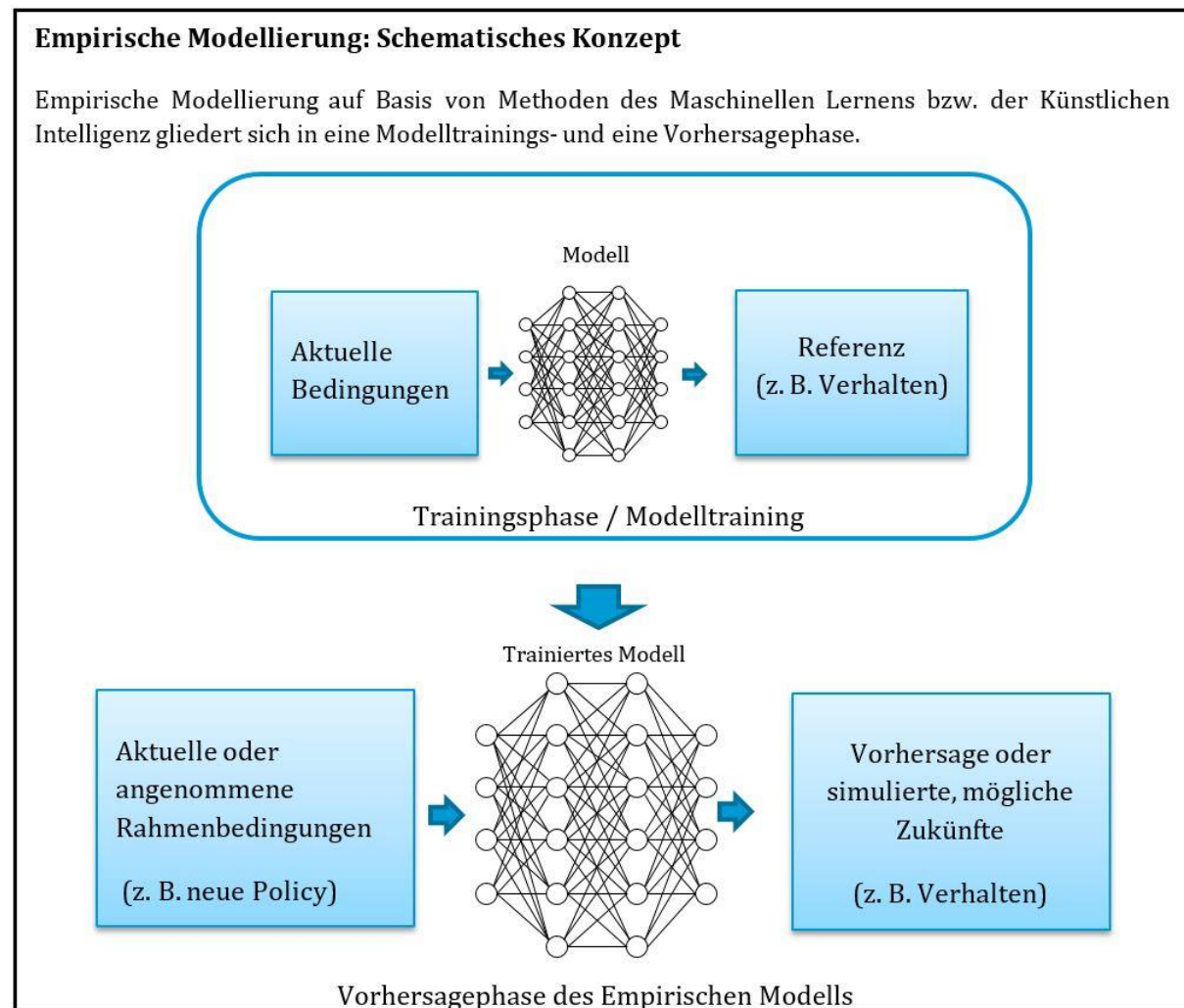
Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- ▶ **auch bekannt als:** *Belief networks (BN)*, *Bayesian belief networks*, in Erweiterung auch *Bayesian decision networks*
- ▶ **Eingaben:** Bedingte Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmter Ereignisse oder der Ausführung von Entscheidungen
- ▶ **Ausgaben:** Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines oder mehrere Ergebnisereignisse oder Entscheidungen
- ▶ **Anwendungen:** Vor allem in der Modellierung für Entscheidungsunterstützungs- und Managementanwendungen, bei denen Unsicherheit ein wichtiger Aspekt ist. Zudem können qualitative und quantitative Daten kombiniert werden. Ebenso sind Vorhersagen möglich. Bayessche Netze sind vor allem in Bereichen hilfreich, wo keine oder wenig historische Daten vorliegen, dafür aber andere Arten von Wissen einschließlich Expertenmeinungen und Umfragedaten verfügbar sind (Kelly 2013).
- ▶ **Limitierungen:** Die räumliche und vor allem zeitliche Dimension können häufig nicht explizit modelliert werden, wofür über einen Umweg jedoch Hilfsvariablen eingeführt werden können. Im Gegensatz zur System Dynamics Methode sind Rückkopplungsschleifen (feedback loops) schwierig zu implementieren. Dazu existieren jedoch Ansätze über die Einführung von Zeitschritten (z. B. Borsuk 2006).
- ▶ **Weiterführende Literatur:** Jensen (1996); Jensen & Nielsen (2007); Ben-Gal (2007); Parry (2013).

3.3.3.5 Empirische Modellierung (auf Basis von Maschinellern Lernen/Künstlicher Intelligenz)

Empirische Modellierung (EM) ist eine Bezeichnung für eine Vielzahl von Verfahren, bei denen der Modellierung durch Beobachtung und Experimente erfolgt. Der Modellaufbau kann verschiedene empirische Verfahren umfassen: (1) ein heuristisches *trial and error* (Versuch-und-Irrtum) Verfahren, (2) eine numerische Näherung des Zusammenhangs zwischen Variablen (zum Beispiel mit Hilfe linearer Regressionsverfahren) oder (3) mit Hilfe von nicht-linearen Maschinellen Lernverfahren als Teilbereich der künstlichen Intelligenz (KI). Auf letzteren soll hier der Fokus liegen, da vorgenannte Verfahren auch als Hilfsmethoden in den anderen Basismethoden, wie SD und ABM, genutzt werden. Bei den Lernverfahren unterscheidet man in überwachtes Lernen (Supervised Learning), unüberwachtes Lernen (Unsupervised Learning, auch Clustering), teilüberwachtes Lernen (Semi-Supervised Learning) sowie verstärkendes Lernen (Reinforcement Learning). Zu den maschinellen Lernverfahren gehören zum Beispiel die Vector-Support-Machines, Ensemble-basierte Verfahren wie Random Forrest oder das aktuelle, immer verbreitetere Deep Learning (DL), das auf der Verwendung sogenannter tiefer (d. h. vielschichtiger) künstlicher neuronaler Netze beruht. Neben den großen Potenzialen dieses Verfahrens wirkt sich allerdings der Black-Box-Charakter dieser Modellart nachteilig auf die gerade in der Politikmodellierung relevante Interpretation des Modells und des Prozessverständnisses aus.

Abbildung 24: Visuelle Darstellung der Methode: Empirische Modellierung



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- **Eingaben:** Reale Beobachtungen und Ergebnisse des Ausgangs eines „Experiments“ (Trainingsphase) bzw. ggf. zusätzlich simulierte Anfangsbedingung für die Vorhersagephase
- **Ausgaben:** Modell, das reale Bedingungen möglichst genau wiedergibt (trainiertes Modell) und genutzt werden kann, um mögliche Zukünfte auf Basis simulierter Anfangsbedingungen abzubilden.
- **Anwendungen:** z. B. Predictive Modelling. Verhaltensmodellierung, Data Mining auf großen Datenmengen (z. B. Mobilfunkdaten) für das Auffinden neuer Zusammenhänge
- **Limitierungen:** Für Verfahren des Maschinellen Lernens/der künstlichen Intelligenz generell müssen (ausreichend) viele Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Durch zu wenige oder ungleich verteilte Eingangsdaten können über-/unterangepasste (over-/underfitted) Modelle bzw. ein Modellbias entstehen. Speziell bei Deep Learning-basierten Verfahren wirkt sich zudem der „Black Box“-Effekt nachteilig auf die Interpretationsmöglichkeiten von Zusammenhängen/Prozessverständnissen aus. Ein weiteres Problem ist der Rechenaufwand (und damit Energieverbrauch) beim Training der Modelle, weshalb gerade bei Umweltthemen eine Abwägung stattfinden sollte (Stichwort: Green Informationstechnologie (IT)/Artifizielle Intelligenz (AI)).

► Weiterführende Literatur: Ruiz Estrada (2019)

3.3.4 Hybride Modellierung (*Hybrid Modeling*)

Die hybride Modellierung bezeichnet ganz allgemein die Kombination oben beschriebener und/oder vieler weiterer existierender Modellierungsansätze und -methoden. Im Fall der Kombination qualitativen und quantitativen Modellierungen wird häufig auch von einem **Mixed-Methods**-Ansatz gesprochen.

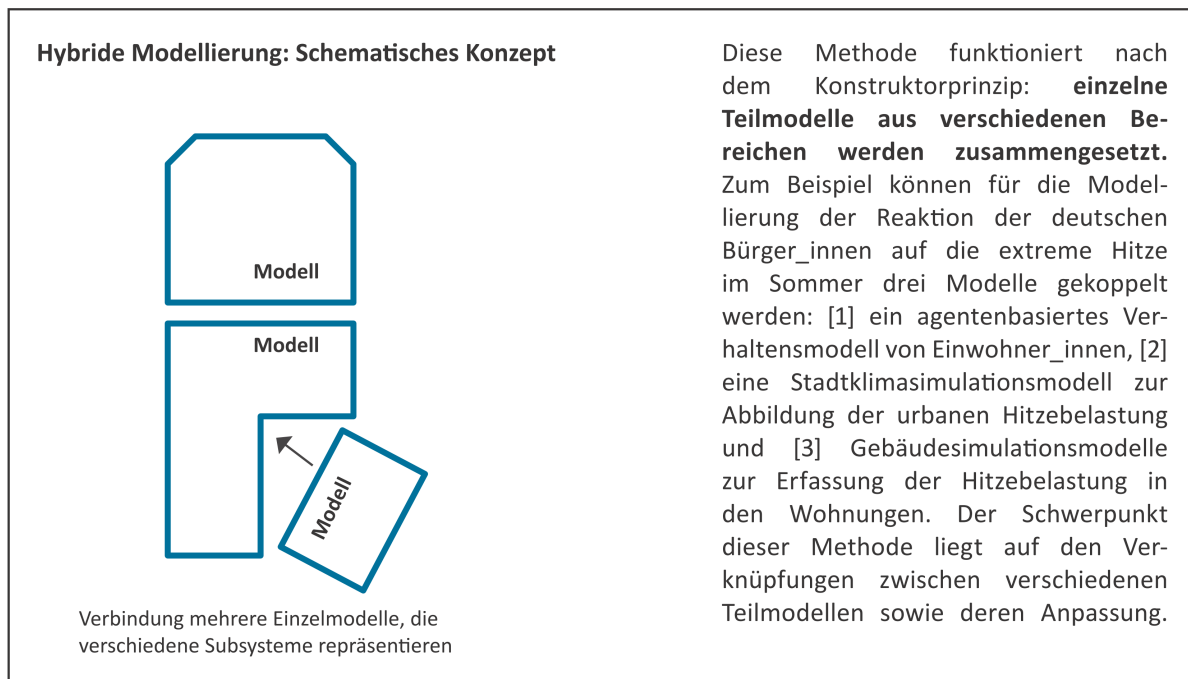
In verschiedenen Kontexten unterscheiden sich jedoch die Modellauswahl und Art der Kombination. Die Kopplung zwischen den Komponenten kann lose sein, d. h. die Ergebnisse der Modelle werden "manuell" miteinander verknüpft (d. h. außerhalb der ursprünglichen Modelle), oder eng, d. h. die Komponentenmodelle sind so konzipiert, dass sie zusammenarbeiten und Eingaben und Ergebnisse gemeinsam nutzen.

Ebenso unterscheiden sich in der Literatur die Definitionen, ab wann von hybrider Modellierung gesprochen wird. Kelly et al. (2013) nennen ABMs, SDs, Knowledge-based networks und Belief Networks. Zudem sehen sie den hybriden Ansatz in der **Kombination von Modellen verschiedener Disziplinen und Sektoren** die ein integratives Ergebnis erzeugen. Demgegenüber definieren Brailsford et al. (2019) hybride Modellierung als ein Ansatz, der zwei oder mehr nur der folgenden Methoden kombiniert: ereignisdiskrete Simulation (DES), Systemdynamik und agentenbasierte Simulation.

In anderen Kontexten wird die hybride Modellierung als Kombination parametrischer und nicht parametrischer (zum Beispiel **KI- bzw. datenbasierte Ansätze**) verstanden (z. B. Kurz 2022) und werden auch als semiparametrische Modelle (z. B. Yang 2011) bezeichnet. Hier werden die Vorteile der Interpretations- und Mustererkennungsmöglichkeiten innerhalb von Big Data durch Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für den ersten Modellierungsschritt genutzt während im zweiten die Nachteile der KI-basierten „Blackbox“-Modellierung durch ein parametrisches Modell ausgeglichen.

Hybride Modellierung ist konstituierend für das weit verbreitete **Integrated Assessment Modelling (IAM)**, auch bekannt unter den Bezeichnungen Metamodels, Integrated Systems Modelling, bzw. Integrated Modelling. IAM ist dabei eine Methode der *Kombination oder Kopplung verschiedener Bewertungsmodelle*, die als Komponenten zur Darstellung sektorenübergreifender, größtenteils komplexer Systeme verwendet sind. Der Output eines Modells wird jeweils zum Input für ein anderes Modell. Nicht zu verwechseln ist IAM mit dem Integral Modelling: hier werden - im Gegensatz zum IAM - alle Teilsysteme gleichzeitig als integrale Bestandteile des Ganzen beschrieben und zusammengefügt, bei der die unabhängigen Teilmodelle erst nach ihrer Erstellung zusammengefügt werden (Voinov 2013).

Abbildung 25: Visuelle Darstellung der Methode: Hybride Modellierung



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

- **auch bekannt als:** *Coupling Component Models*
- **Eingaben:** Modelle verschiedener Disziplinen, die verschiedene Teile des Systems darstellen. Die Eingaben sind abhängig von Modellaufbau und verwendeten Komponenten (s. dort). Im Fall semi-parametrischer Modelle können und müssen die Eingangsdaten für das Training der KI-Modelle von großer Menge sein.
- **Ausgaben:** Beeinflussende Ergebnisse der jeweiligen Teilmodelle auf das kombinierte Systemverhalten.
- **Anwendungen:** Durch die Kombination können die Vorteile verschiedener Ansätze kombiniert werden und Nachteile vermindert werden. So können beispielsweise die Emergenzen in Systemen mit Hilfe von ABM mit der top-down-Perspektive der SD-Modellierung gewinnbringend verknüpft werden. Ein hybrides Modell könnte zum Beispiel die Kombination eines Klimamodells, eines demografischen Modells und eines Verhaltensmodells des individuellen Energieverbrauchs repräsentieren.
- **Limitierungen:** Abhängig vom Modellaufbau und der Art der verwendeten Komponenten (für jeweilige Limitierungen, siehe dort). Die Verknüpfung bereits bestehender Modelle und die Anpassung der Variablen, Skalen und Auflösungen kann eine Herausforderung sein. Modellierer_innen können unterschiedliche Paradigmen, Annahmen sowie räumliche und zeitliche Darstellungen verwenden, die sorgfältig analysiert und angepasst werden müssen. Zudem kann die Schnittstellendefinition zwischen den Modellkomponenten aufwändig sein. Bei hybrider Modellierung im Verständnis gekoppelter parametrischer und nicht-parametrischer Modelle können Teilsysteme bzw. das Verhalten von Teilsystemen nur als „Blackbox“ verstanden werden. In Zukunft könnte hier jedoch durch Ansätze der *Explainable AI* (XAI) bzw. Interpretable AI weitreichende Fortschritte (Samek 2019) erzielt und die Limitierung überwunden werden.

- **Weiterführende Literatur:** Brailsford (2019); Yang (2011); Samek (2019); Kurz (2022).

Ein zentrales Problem hybrider Modellierung komplexer Systeme allgemein kann die Fülle und teilweise Widersprüchlichkeit der Ergebnisse einzelner (Sub-)Modelle oder auch Modellläufe sein. Ein weit verbreitetes Tool zur Bewertung mehrerer (evtl. widersprüchlicher) Kriterien bei der Entscheidungsfindung ist die **Multikriterielle Entscheidungsanalyse (*Multiply Criteria Decision Analysis; MCDA*)**. Entscheidungsträger_innen sind bei komplexen Problemen in der Regel damit konfrontiert, dass es nicht nur eine beste Lösung gibt, sondern dass es mehrere optimale Optionen sein können, je nachdem, nach welchen Kriterien das Problem bewertet wird. Wenn politische Entscheidungen getroffen werden sollen, muss die Vielzahl der Betroffenen und Perspektiven berücksichtigt werden. Außerdem ist es unmöglich, alle Dimensionen einer komplexen Entscheidung auf eine einzige Bewertungsskala zu reduzieren. Die multikriterielle Bewertung bietet daher einen starken Rahmen für die Erfüllung der Ziele der Inter-/Multidisziplinarität, der Partizipation und der Transparenz.

Methoden der MCDA unterstützen (1) den Entscheidungskontext zu analysieren, indem sie die Akteur_innen, die verschiedenen Handlungsmöglichkeiten und deren Konsequenzen identifizieren; (2) die Entscheidungsträger_innen zur Zusammenarbeit zu bewegen, indem wichtige Faktoren für ein besseres gegenseitiges Verständnis und einen diskussionsfördernden Rahmen vorgeschlagen werden und (3) Empfehlungen auf der Grundlage von Ergebnissen aus Modellen und Rechenverfahren zu erstellen (Greco 2016).

3.4 Verhaltensmodellierung: Abbildung der sozialen Dimension

Die computerbasierte Sozialforschung hat sich in den letzten Jahrzehnten erheblich weiterentwickelt und bietet eine Vielzahl von Modellierungsmöglichkeiten für vielfältige kollektive Phänomene und individuelles Verhalten. Die Modellierung jedes sozialen Prozesses beruht im Kern auf einer sozialen, psychologischen, ökonomischen oder anderweitigen Theorie, die dieses Verhalten (hypothetisch) erklären soll. Deshalb ist die computergestützte Modellierung im sozialen Kontext eng mit einer vorläufigen qualitativen Konzeptualisierung von umfassenden Verhaltensinteraktionen sowie -faktoren verbunden.

Bei der Verhaltensmodellierung werden die realen Akteur_innen bzw. Gesellschaften durch künstliche (*artificial societies*) als komplexe, nicht-lineare Systeme abgebildet (Giabbanelli 2019; Diallo 2020). Die Herausforderung liegt darin zu bestimmen, wie diese abgebildet werden sollen. Die Methoden der sozialen Netzwerkanalyse oder der agentenbasierten Modellierung eignen sich am besten, um die komplexe Architektur einer künstlichen Gesellschaft detailliert nachzubilden (Conte 2012). Die Methode der zellulären Automaten kann ebenso geeignet sein, wenn es um die räumliche Fixierung sozialer Einheiten geht (z. B. bei der Frage der Zersiedlung oder urbanen Verdichtung). Die Modellierung mit Hilfe von *System Dynamics* eignet sich auch für soziale Simulationen, jedoch im Rahmen von höher aggregierten Phänomenen (z. B. die Gesamtmotivation von Gruppen von Menschen).

Je nach Zweck und Komplexität des Modells werden die folgenden Aspekte auf Basis verschiedener angewandter Theorien konzipiert und konstruiert:

- die Art und Struktur der sozialen Beziehungen und Einflüsse innerhalb der betrachteten Akteur_innen
- Abbildung einer angemessenen und relevanten Heterogenität der Sozialstruktur der Akteur_innen

- Attribute der virtuellen Individuen, die in das Modell eingebettet sind (auch mit möglichen Angaben zur individuellen Verhaltens- und Kognitionsstruktur) (Conte 2012).

Die zuvor diskutierten Modellierungsansätze System Dynamics, Agentenbasierte Modellierung u. a. können generell zur Verhaltensmodellierung genutzt werden. Dabei ist jedoch anzumerken, dass komplexe Systeme auch mit diesen Ansätzen modelliert werden können, ohne Verhaltensänderungen zu berücksichtigen. Dem gegenüber ist bei komplexen sozialen bzw. adaptiven Systemen die Berücksichtigung der Beschreibung des Verhaltens von Akteur_innen von zentraler Bedeutung. Dieses wird dann als „Modul für menschliche Entscheidungsfindung“ (Schrieks 2021) in System Dynamics oder ABM u. a. Modelle integriert. Die zentrale Frage dabei ist, wie das Verhaltensmodul die Entscheidungsfindung von Akteur_innen abbildet. Hierzu gibt es zahlreiche Ansätze. Traditionell wird menschliches Verhalten oft als rein rational abgebildet, obwohl die individuellen Entscheidungen in der Realität räumlich und zeitlich heterogen sind (Huber 2018). Dass menschliche Entscheidungen nicht rein rational sind und die Informationslage zur Entscheidung der Akteur_innen nicht vollständig ist, wird im erweiterten Ansatz der „*bounded rationality*“ berücksichtigt. Die Vielfalt der Ansätze zur Modellierung von Akteursverhalten ist sehr groß. Somit ist die Wahl des für eine Modellierungsfrage passenden Verhaltensmodellierungsansatz für die Modellierer_innen herausfordernd. Im Folgenden werden die wesentlichen Ansätze kurz vorgestellt:

1. **Ad hoc Annahmen:** Hierbei wird die Entscheidungsfindung auf einfache Annahmen der Modellierer_innen beschränkt, ohne den zugrundeliegenden kognitiven Prozess zu modellieren.
2. **Ökonomische Verhaltenstheorien,** wie die Theorie des erwarteten Nutzens (Von Neumann 1947) oder die *Prospect* Theorie (Kahneman 1979), beschreiben Akteure bei risikoreichen Entscheidungen. Erstere beschreibt ein Akteursverhalten, das durch rationale Überlegungen aufgrund seiner eigenen Interessen gelenkt wird. Die Akteure haben dabei vollkommene (perfekte) Informationsgrundlagen für ihre Entscheidung. Daher wurde dieser Ansatz kritisiert, weil er die Komplexität und Irrationalität des menschlichen Verhaltens nicht genügend berücksichtigt. Diese Modelle erfassen nicht die Feinheiten des ethischen Verhaltens, sondern eher die abstrakten Entscheidungen der Devianz und Kooperation. Die *Prospect* Theorie als Erweiterung der Theorie des erwarteten Nutzens geht jedoch davon aus, dass Menschen den Nutzen von Gewinnen und Verlusten als Abweichung von einem Referenzpunkt bewerten und dass es Unterschiede in den Präferenzen für Gewinne und Verluste der Akteure gibt.
3. **Psychologische Theorien,** wie die Theorie des geplanten Verhaltens (*Theory of Planned Behavior*, Ajzen 1991) oder die Theorie der Schutzmotivation (*Protection Motivation Theory*, Rogers 1983) haben ihren Ursprung in der Psychologie. Die Theorie des geplanten Verhaltens geht davon aus, dass die Entscheidung durch wahrgenommene Verhaltenskontrolle, subjektive Normen und persönliche Einstellungen gesteuert wird. Nach der Theorie der Schutzmotivation hängt das Verhalten einer Person, sich anzupassen, von der Bewertung des Risikos und der Bewertung der Bewältigung ab. Der Prozess der Risikobewertung besteht aus der wahrgenommenen Wahrscheinlichkeit und dem wahrgenommenen Ausmaß der bewerteten Ereignisse. Eine Herausforderung bei der Verwendung dieser Theorien in Verhaltensmodelle ist, dass die psychologischen Einflussgrößen auf des Verhalten subjektive Modellparameter sind und die ursprüngliche Theorie keine mathematische Formalisierung bietet (Schlüter 2017).

Einen Überblick über die Einflussfaktoren sowie die Vor- und Nachteile dieser Verhaltenstheorien befindet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Theorien zur Verhaltensmodellierung (nach Schrieks 2021)

Theorie	Entscheidende Aspekte	Vorteile	Nachteile
Theorie des erwarteten Nutzens (<i>Expected Utility Theory</i>)	Kosten; Nutzen; Risikobereitschaft durch Nutzwertkurve; Zeitpräferenzen; Risikowahrnehmung; Einkommensbeschränkungen	Vollständige Risikoverteilung. Einfache Verknüpfung mit Modellen zur Risikobewertung von Naturkatastrophen auf der Grundlage von Kosten und Nutzen. Kalibrierung kann mit Hilfe von Wirtschafts-labor- und Feldexperimenten durchgeführt werden.	Andere psychologische Faktoren, wie z. B. die wahrgenommene Handlungsfähigkeit, subjektive Normen und Überzeugungen, werden nicht berücksichtigt. Keine (oder begrenzte) <i>Bounded Rationality</i> in der traditionellen EUT, aber Fehlwahrnehmungen von Risiko sind in einer subjektiven EUT erlaubt. Begrenzte Heterogenität in subjektiven EUT
Prospect-Theorie	Kosten; Nutzen; Risikobereitschaft durch Nutzwertkurve und Wahrscheinlichkeitsgewichtung; Zeitpräferenzen; Risikowahrnehmung; Verlustaversion; Einkommensbeschränkungen	Vollständige Risikoverteilung. Berücksichtigung von Verlustaversion und beschränkter Rationalität bei der Bewertung von Risiken. Kalibrierung kann mit Hilfe von Wirtschafts-labor- und Feldexperimenten durchgeführt werden.	Andere psychologische Faktoren, wie z. B. die wahrgenommene Handlungsfähigkeit, subjektive Normen und Überzeugungen, werden nicht berücksichtigt.
Theorie der Schutzmotivation (<i>Protection Motivation Theory</i>)	Wahrgenommene Wahrscheinlichkeit; Wahrgenommene Schwierigkeit; Wahrgenommene Selbstwirksamkeit; Wahrgenommene Reaktionseffizienz; Wahrgenommene Reaktionskosten	Verknüpfung von Risikowahrnehmung und wahrgenommenen Kosten und Nutzen aus ökonomischen Theorien mit individuellen Wahrnehmungen der Anpassung	Keine vollständige Risikoverteilung und keine Berücksichtigung von Risikobereitschaft und Zeitpräferenzen
Theorie des geplanten Verhaltens (<i>Theory of Planned Behaviour</i>)	Wahrgenommene Verhaltenssteuerung; Subjektive Normen; Einstellungen	Einbeziehung von individuellen Einstellungen und subjektiven Normen	Keine vollständige Risikoverteilung und keine Berücksichtigung von Risikobereitschaft und Zeitpräferenzen

Quelle: nach Schrieks (2021)

Die Verhaltenstheorien beschreiben die Einflussgrößen und Prozesse, die auf die Entscheidung von Akteuren Einfluss haben. Eine weitere große Herausforderung ist jedoch die Parametrisierung dieser Einflussgrößen, um ein realitätsnahes Verhalten abzubilden. Diese Herausforderung wird dadurch erschwert, dass die Einflussgrößen nicht homogen in der Gesellschaft vorliegen, sondern einer Verteilung unterliegen und abhängig von Alter, Geschlecht, Einkommen etc. sind. Für diese Parametrisierung stehen ebenfalls verschiedene Ansätze zur Verfügung, von denen wir hier die wichtigsten kurz auflisten wollen:

1. Der **statistikgestützte Ansatz** zur Parametrisierung des Verhaltensmodells nutzt Statistiken oder Beweise des Verhaltens aus der Vergangenheit. In der Regel ist es notwendig, Daten auf individueller Ebene mit aggregierten Angaben zu kombinieren, die allgemeine Trends widerspiegeln. Beweise aus der Vergangenheit umfassen neben Statistiken auch Ereignisverläufe und alle Informationen, die dazu beitragen, einen Zusammenhang zwischen politischen Maßnahmen und den daraus resultierenden Ergebnissen herzustellen (Seligman 2012).
2. **Befragungen** einer repräsentativen Gruppe von Akteuren, deren Verhalten im Modell abgebildet werden soll. Dabei sind die Fragen so entworfen, dass aus ihrer Beantwortung die Einflussgrößen des Modells parametrisiert werden können (Schrieks 2021). Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass eine direkte Parametrisierung möglich ist. Eine Limitierung stellt die Annahme dar, dass die Befragten die Befragung realistisch beantworten und es keine Verzerrung zum wirklichen Handeln und Präferenzen gibt.
3. **Data Science**: Die Parametrisierung des Verhaltensmodells kann ebenso auf Basis von Verhaltensdaten entnommen werden, die innerhalb von sozialen Netzwerken oder anderer digitaler Dienste erhoben werden (auch passives Crowdsourcing). Dies kann von individuellen Bewegungsmustern über Kaufentscheidungen bis hin zur Emotionserkennung reichen. Hierbei sind allerdings die Anforderungen des Datenschutzes zu beachten, welche auch derartige Nutzungen stark limitieren können.

Wie bei jeder Modellierungsmethode sollte zur Prüfung der Modellqualität nach der Parametrisierung des Modells dessen Validierung stehen sowie eine ausgiebige Sensitivitätsanalyse erfolgen, um den Einfluss der Parameter auf die Modelldynamik zu prüfen.

Eine zentrale Herausforderung bei der Verhaltensmodellierung ist, dass in den bisherigen Modellierungen sowohl die Beschreibung der zugrundeliegenden Verhaltenstheorie als auch die Argumentation für die Auswahl der Theorie oft begrenzt sind. Zudem kommt es zu unterschiedlichen Interpretationen und Umsetzungen der Theorien im Verhaltensmodell (Schrieks 2021). Diese Subjektivität führt bisher dazu, dass es (wie bei der Modellierungsmethode ABM) schwierig ist, Verhaltensmodelle miteinander zu vergleichen.

3.5 Fazit

Die Ausführungen, Gliederung und Modellauswahl beruhen auf einer **generalisierten und interdisziplinären, anwendungsorientierten Perspektive**. Den Autoren ist bewusst, dass disziplinäre Zugänge andere Methodenbezeichnungen, Einordnungen und Modellabgrenzungen verwenden.

Zudem sind die **Grenzen zwischen den Modellen fließend**. Bestimmte Modelle können **zu mehr als einer Klasse gehören** oder eine Mischung aus mehr als einer Klasse sein. Beispielsweise kann ein Bayes'sches Netzwerk (BN), das aus Interaktionen zwischen Individuen besteht, auch als agentenbasierte Methode (ABM) oder sogar als Expertensystem betrachtet werden, wenn die Struktur des Netzwerks und die Informationen, von Expertenmeinungen abgeleitet worden sind

(vgl. Kelly 2013). Andererseits können agentenbasierte Modelle mit ausschließlich immobilen Akteuren auch als Zelluläre Automaten interpretiert werden.

Sowohl bei den qualitativen als auch bei den (semi-)quantitativen Methoden lassen sich unterschiedliche Klassifizierungen und Typologien erkennen. So bezeichnet beispielsweise Badham (2010) die sogenannte *Soft Systems Methodology* als eine eigene Kategorie qualitativer Modellierungsverfahren, wobei sie sich auf *Rich Text Pictures* und *CATWOE Methode* konzentriert. In einem Interview mit der Autorin des Artikels (Juni 2022) wies sie jedoch auf die fragilen und unscharfen Grenzen zwischen den verschiedenen Methoden hin, was die Unterscheidung zwischen ihnen erschwert.

Auch existieren Klassifikationsschemata, die **Monte-Carlo-Simulation** (*Monte Carlo methods* oder *Monte Carlo experiments*) oder **Deep Learning/KI-Ansätze** als eigenständige Modellierungsansätze betrachten. Erstere werden jedoch häufig als Hilfsmittel zur Kalibrierung, Validierung und für die Sensitivitätsanalyse von Modellen verwendet, während zweite immer häufiger, insbesondere im Zusammenhang mit der hybriden Modellierung, zur Analyse großer Eingangsdaten (zum Beispiel der Erstellung von Meinungsbildern aus sozialen Netzwerk-Beiträgen oder der Analyse von Strategiedokumenten) verwendet werden.

Der im Abschnitt zur hybriden Modellierung erwähnte Ansatz der **Discrete-Event-Simulation** (ereignisdiskreten Simulation) wird insbesondere in der Operations Research, d. h. in der Entwicklung und dem Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verwendet. Da dieser Ansatz ausschließlich ereignisbasiert (typischerweise Produktionsabläufe oder Wareneingänge) ist, eignete sich das Verfahren in der Politikmodellierung ausschließlich in Kombination mit anderen Modellen (z. B. ABM), beispielsweise, um diskrete Ereignisse wie Strategieänderungen zu modellieren.

Zusätzlich können sich die Gruppierung und Einordnung der Modellierungsansätze auch über die Zeit ändern. KI-basierte Ansätze können derzeit nur sehr bedingt im Bereich der Politikmodellierung empfohlen werden, da durch das derzeitige methodische Design zwar sehr gut ein bestimmter Output bei zahlreichen Inputs simuliert werden, nicht jedoch Zusammenhänge oder Kausalitäten explizit modelliert werden kann (sogenannte „Blackbox“). In Zukunft könnten hier jedoch Fortschritte auf dem Gebiet der **„Explainable AI“ (XAI)** (z. B. Samek 2019) bzw. **„Interpretable AI“** erzielt und somit zukünftig eventuell als eigenständiger Ansatz innerhalb der Politikmodellierung aufgefasst werden.

Ein generelles Problem in der Modellierung komplexer Systeme können zum einen die Fülle als auch die teilweise Widersprüchlichkeit der Ergebnisse einzelner Modelle bzw. Modellläufe sein. Entscheidungsträger_innen sind bei komplexen Problemen in der Regel damit konfrontiert, dass es nicht nur eine beste Lösung gibt, sondern dass es mehrere optimale Optionen sein können, je nachdem, nach welchen Kriterien das Problem bewertet wird. Hier können Methoden der **Multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Multiply Criteria Decision Analysis; MCDA)** helfen, den Herausforderungen der Bewertung mehrerer widersprüchlicher Ergebnisse oder Kenngrößen, der Inter-/Multidisziplinarität, der Partizipation und der Transparenz zu begegnen.

Durch die vorangegangene Vorstellung der Vielzahl an Methoden und ihrer spezifischen Eigenschaften, Vorteile und Limitierungen wird klar, dass es im Rahmen der Politikmodellierung per se keine vorzuziehende Methode gibt, sondern die Modellauswahl oder -kombination ganz entscheidend von der Problemstellung und zu modellierenden Domäne abhängt.

Insgesamt scheint für die Modellierung komplexer Systeme ganz allgemein jedoch die hybride Modellierung in der Kombination von top-down- und bottom-up-Ansätzen als besonders zielführend.

4 Chancen und Limitierungen von Politikmodellierung mit Akteursbezug

4.1 Chancen

Modellierungen von komplexen System (mit Akteursbezug) stellen eine weitreichende Möglichkeit dar, die Entscheidungsprozesse in der Politikberatung durch zusätzliche und meist tiefere Informationen über Systemstrukturen, Dynamiken, Verhalten und Eintrittswahrscheinlichkeiten als mit anderen Methoden der Politikberatung zu unterstützen. Die Art und Weise dieser Unterstützung hängt dabei davon ab, welcher Modellierungsansatz gewählt wird, v. a. aber, ob dieser qualitativ oder quantitativ ist (Coyle 2000). Im Folgenden wird eine Auswahl an Möglichkeiten aufgelistet, wie die diskutierten Ansätze und Methoden der Politikmodellierung mit Akteursbezug den Politikprozess unterstützen können.

- ▶ **Modelle zum Experimentieren von Entscheidungsträger_innen:** Vor allem die vorgestellten Ansätze der quantitativen Ex-ante-Modellierungen ermöglichen den Entscheidungsträger_innen ein Experimentieren mit Einflussgrößen in der virtuellen Welt (Gilbert 2018). Somit kann vor Einführung eines Politikinstrumentes geprüft werden, in welche Art und Weise es das Verhalten der Akteure beeinflusst. Die Vorteile im Vergleich zur Ex-post-Beobachtung der Einflüsse von Entscheidungen auf die reale Welt liegt auf der Hand.
- ▶ **Erweiterung des linearen Denkmusters:** Komplexe Probleme sind selten linear und lassen sich entsprechend selten auf die klassische lineare Ursache-Wirkungs-Beziehung (*binary thinking*) reduzieren. Letztere ist jedoch die üblicherweise vom Menschen in mentalen Modellen genutzte Form der Problemvereinfachung. Das liegt daran, dass es schwerfällt, nicht-lineare dynamische Prozesse (Beispiele: ein vermeintlich kleiner Einfluss bringt das System in einen neuen Zustand (Kipppunkte) oder die Problemlösung führt zu unbeabsichtigten Nebeneffekten) ohne Hilfsmittel zu erfassen und deren Verhalten zu verstehen (Hovmand 2014). Die meisten vorgestellten qualitativen und quantitativen Modellierungsansätze versuchen genau diese nicht-linearen Beziehungen zwischen Ursachen und Wirkungen darzustellen. Die qualitativen Ansätze des Systemdenkens zielen darauf ab darzustellen, wie die Elemente eines Systems oder Problems miteinander in Verbindung stehen. Kausaldiagramme zeigen dabei auf, welche verstärkenden und ausgleichenden Rückkopplungen dabei sichtbar werden und verdeutlichen die Systemstruktur, die das Systemverhalten induziert (Scott 2018). Die quantitativen Modellierungsansätze wie System Dynamics oder agentenbasierte Modellierung gehen noch einen Schritt weiter, zeigen nicht-lineare, dynamische Verhaltensänderungen von Systemen auf, wenn diese einer äußeren Störung (z. B. durch ein Politikinstrument) unterliegen. In der Politikberatung sind diese Formen der Modellierung vor allem bei komplexen Problemen wie der Klimaanpassung von großer Bedeutung, damit Entscheidungsträger_innen nicht auf Grundlage zu stark vereinfachter mentaler Modelle fehlerhafte Entscheidungen treffen oder nicht erfolgreiche Politikinstrumente einführen.
- ▶ **Erweiterung des Systemverständnisses durch Erweiterung des mentalen Modells:** Mentale Modelle sind ein Konstrukt aus der Kognitionswissenschaft zur Beschreibung einer internen Repräsentation einer externen Realität (Craik 1943). Anders ausgedrückt, stellen sie das individuelle Systemverständnis zu einer Fragestellung dar. Diese mentalen Modelle beschreiben das System immer unvollständig und sind einem ständigen Wandel (meist durch Informationsgewinn) unterlegen (Scott 2018). Die Politikberatung zielt darauf ab, die mentalen Modelle durch Informationen und Lerneffekte von Entscheidungsträger_innen zu

verbessern. Dies gilt auch für die vorgestellten Ansätze der qualitativen und quantitativen Modellierung. Allerdings zielen die Ansätze zur Beschreibung des Verhaltens und der Dynamik komplexer Systeme (allen voran Systemdenken, System Dynamics, agentenbasierte Modellierung) neben spezifischen Problemlösungen darauf ab, auch das zuvor erwähnte lineare Denkmuster zu einem nicht-linearen zu erweitern. Dabei ist das Ziel dieses Lernprozesses, dass das mentale Modell von Entscheidungsträger_innen bei zukünftigen Fragestellung komplexer Systeme nicht von der häufig fehlerhaften Annahme einer linearen Ursache-Wirkungs-Beziehung ausgeht (Scott 2018).

- ▶ **Partizipative Modellierung – Konsensfindung, Modellakzeptanz:** Partizipative Modellierung komplexer Systeme mit beteiligten Stakeholdern und Akteuren ist ein zentraler Ansatz des Systemdenkens und der *System Dynamics*. Eine häufig genutzte Form ist in diesem Zusammenhang das *Group Model Building* (Vennix 1996). Dort wird die dem problematischen Verhalten zugrundeliegende Systemstruktur durch die Einbeziehung der individuellen mentalen Modelle (Systemverständnisse) der Beteiligten (Stakeholder, Akteure) gemeinsam in Workshops erarbeitet. Hierbei werden oft Kausaldiagramme erstellt, deren großer Vorteil darin liegt, dass die visuelle Art (*Boundary object* Konzept) der Systembeschreibung (Variablen und Verbindungen mit Rückkopplungsschleifen) keine Fachexpertise der Beteiligten benötigt und diese Methode somit ideal ist für interdisziplinäre oder transdisziplinäre Zusammenarbeit (*Shared language* Konzept) (Scott 2018). Dies hat eine Vielzahl an Vorteilen. Neben dem Effekt, dass durch solche Einbeziehung die Systemstruktur wesentlich vollständiger beschrieben werden kann, führt diese Methode in gewissen Maße auch zur Erweiterung des individuellen Systemverständnisses der Beteiligten und somit zu Lerneffekten (Hovmand 2014). Durch diese Erweiterung der eigenen Perspektive kann es leichter fallen, einen Konsens mit den anderen Beteiligten zu finden, um gemeinsam übergreifende Lösungen (z. B. in Form von Politikinstrumenten) zu entwickeln. Diese Beteiligung an der Modellentwicklung kann auch bei quantitativen Modellierungsansätze geschehen. Neben den erwähnten positiven Effekten der Erhöhung der Modellqualität (vollständigere Systemabbildung), führen solche Beteiligungsprozesse auch dazu, dass die Identifikation und Glaubwürdigkeit des Modells bei den Beteiligten (z. B. Politiker_innen) deutlich gesteigert werden kann (*Model ownership* Konzept) (Bach 2019). Damit wird die Akzeptanz und somit die potenzielle Nutzung der Modellierungsergebnisse wahrscheinlicher. Ein kritischer Punkt des Ansatzes der partizipativen Modellierung ist der Zeitaufwand für die Beteiligten zur Erstellung des Modells. Dies muss jedoch relativiert werden durch Betrachtungen, ob der Mehraufwand in diesem Prozess das erlangte gemeinsame Systemverständnis die daraus evtl. abgeleiteten besseren Problemlösungen aufwiegt.
- ▶ **Nutzung einfacher Modelle:** Modelle, welche die Komplexität einer Fragestellung umfassend beleuchten wollen, neigen dazu, sehr groß zu werden. Das bedeutet, dass die Vielzahl an Variablen und Wechselwirkungen dazu führt, dass die Adressaten des Modells (z. B. Politiker_innen) aufgrund mangelndem Modellverständnis die Ergebnisse in Frage stellen. Dieser sehr relevanten Problematik kann man entweder durch Strukturierungen entgegenwirken oder aber durch Abbildung sogenannter Submodelle, d. h. Teilfragestellungen, die sich aus der umfassenden Systembetrachtung ergeben. Vonk und Geertman (2008) stellten fest, dass die Nutzer_innen einfache Modelle gegenüber fortgeschrittenen Modellen bevorzugen. Dies ist verständlich, da ein Modellverständnis die Glaubwürdigkeit erhöht. Entsprechend ist der Modellierer im Spannungsfeld, möglichst einfache Modelle zu entwickeln, aber gleichzeitig die Komplexität der Problematik abzubilden.

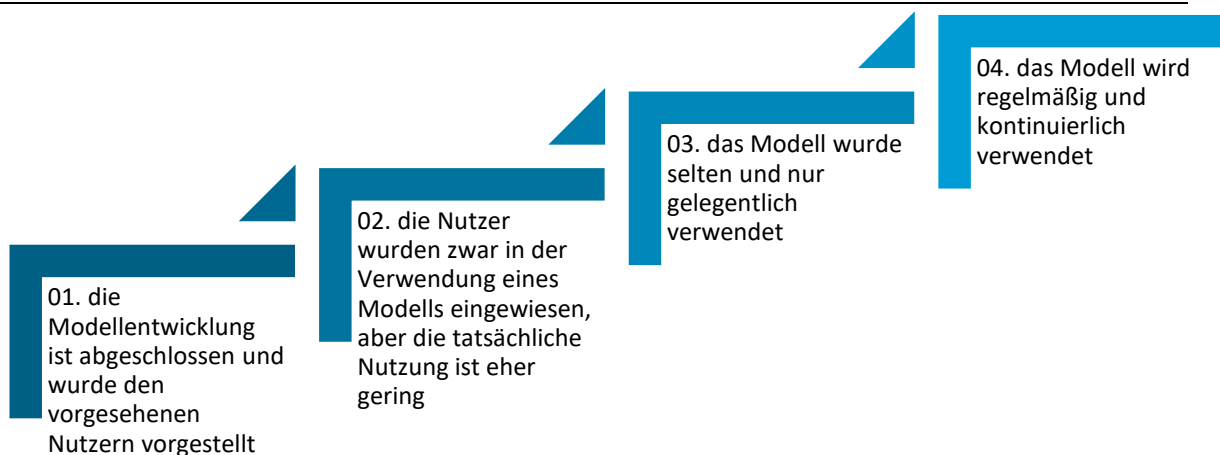
4.2 Limitierungen

Wie jede Form der Politikberatung hat auch die Politische Modellierung gewisse Grenzen, die hier kurz erläutert werden sollen:

Organisatorische Grenzen

- **Benötigte Ressourcen:** Vor allem die computergestützte Modellierung ist ressourcenintensiv - die Erstellung eines effektiven Modells kann im Durchschnitt mehr als ein Jahr dauern - wobei unterschiedlichste Fachexpertisen erforderlich sind. Die Zeiträume, in denen politische Entscheidungen stattfinden müssen, sind hingegen fast immer relativ kurz. Da die spezifischen Bedürfnisse der Politikmodellierung teilweise nur schwer vorhersehbar sein, kann das dazu führen, dass Computermodele nicht rechtzeitig Unterstützung leisten können. Darüber hinaus müssen Zeit und Ressourcen für die Datenerfassung und -verarbeitung sowie für die Konzipierung des Modells eingeplant werden, insbesondere, wenn dies auf partizipative Weise geschieht (Turnpenny 2008).
- **(Nicht-)Akzeptanz der Politikmodelle:** Fallstudien zeigen, dass entwickelte Modelle aus mehreren Gründen nicht bis zur praktischen Anwendung gelangen können (Adelle 2012a). Zum Beispiel aufgrund von Inflexibilität und Inkonsistenz (Niederlande) oder Überschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen (UK) (Kolkman 2016). Nach McIntosh et al. (2007) gibt es vier Stufen der Akzeptanz von Politikmodellen durch die Endnutzer_innen, wie in Abbildung 26 dargestellt. In der Politikberatung wird angestrebt, die maximale Akzeptanz so zu erreichen, dass ein entwickeltes Modell in die reguläre Entscheidungsroutine von Entscheidungsträger_innen aufgenommen wird. Leider gibt es bisher keine Einigkeit darüber, inwieweit die Eigenschaften eines Modells seine Akzeptanz beeinflussen. So behaupten manche Wissenschaftler_innen, dass die Akzeptanz von Modellen von der Art des Modells abhängt und dass sich die Benutzeranforderungen an Modelle nicht verallgemeinern lassen, während andere argumentieren, dass es keine Beweise dafür gibt, dass Modelleigenschaften die Modellakzeptanz bestimmen (Kolkman 2016).

Abbildung 26: Stufen der Modellakzeptanz



Quelle: McIntosh (2007)

- **Systemverständnis:** Erfolgreiche Modellierung erfordert ein Systemverständnis - komplexe Themen (wie z. B. die Anpassung an den Klimawandel) erfordern eine komplexe Systembetrachtung. Zahlreiche kausale Zusammenhänge sind schwer zu definieren und im

Falle der quantitativen Modellierung ist es noch schwieriger, ihre gegenseitigen Einflüsse zu quantifizieren und zu bewerten (Sterman 2002).

- ▶ **Verhaltensmodellierung:** Bei der Modellierung von sozialen Komponenten hängt der Erfolg auch davon ab, ob die Komplexität des Verhaltens der Menschen realistisch dargestellt wird. Die Entscheidung, auf welche psychologische oder soziologische Theorie man sich stützt oder welche Grundannahmen man über die Motive und das Verhalten von Menschen trifft, ist nicht immer einfach und erfordert sowohl ausreichende Kenntnisse im Bereich der Verhaltensmodellierung als auch eine gute Modellierungsintuition. Letztendlich muss ein Modell so komplex sein, dass es die wichtigsten Aspekte der Realität abbildet, aber einfach genug, um es vermitteln zu können (Darnton 2008).
- ▶ **Veränderung und Ungewissheit:** Das Umfeld, in dem die Politik umgesetzt wird, kann sehr ungewiss sein, was die Modellentwicklung gefährden kann, wenn sich Überzeugungen oder Entscheidungen als Ergebnis des Modellierungsprozesses ändern (obwohl dies ebenfalls ein wichtiges Ergebnis und ein Vorteil des Modellierungsprozesses sind).
- ▶ **Stakeholder:** Es gibt viele verschiedene Interessengruppen, die an der Entwicklung politischer Instrumente und Maßnahmen beteiligt oder davon betroffen sind. Es wird nicht möglich sein, sie alle in den Prozess der Politikmodellierung einzubeziehen. Dennoch gibt es nach Kelly (2013) mehrere Gründe, die für eine Einbeziehung der Öffentlichkeit sprechen. Dazu gehören die Möglichkeit einer informierteren und innovativeren Entscheidungsfindung, eine größere Akzeptanz der Bevölkerung und die Mitverantwortung für die Entscheidungen (*ownership of the decisions*), eine offenerere und integriertere Regierung, eine stärkere Demokratie sowie soziales Lernen, um Probleme zu bewältigen.
- ▶ **Modellieren ist keine Wunderwaffe:** Wichtig ist zu beachten, dass ein Modell nur weitere Informationen für den Entscheidungsprozess liefern kann und soll, und nicht eine endgültige Entscheidung, die im politischen Prozess einfach umgesetzt werden muss. Außerdem kann ein Modell nicht mehr Informationen liefern, als darin eingegeben werden. Es ist nur so leistungsfähig und zuverlässig wie die Daten und Annahmen, die zugrunde liegen und ausgewählt sind. Süsser (2021) weist darauf hin, dass Modelle nicht nur eins von mehreren Inputs für politische Entscheidungen sein können, sondern auch sein müssen: eine enge und direkte Verbindung zwischen Modellen und konkreten politischen Maßnahmen ist weder zu erwarten noch wünschenswert.

Ethische Grenzen

- ▶ **Politische und pragmatische Realitäten der Entscheidungsfindung:** Die Wertvorstellungen und politischen Werte von Einzelpersonen können einen großen Einfluss auf den Modellierungsprozess ausüben, selbst wenn empirische Beweise vorliegen, die ihrer Ansicht widersprechen oder auf Maßnahmen hindeuten, die ineffizient sind. Politische Modelle enthalten außerdem immer einen Anteil an Subjektivität, da nicht alle Erkenntnisse durch empirische Daten gestützt werden können (Süsser 2021; Turnpenny 2008). Objektive Politikmodelle gibt es nicht, denn sie werden von Akteuren mit bestimmten eigenen Interessen und Zielen in vermachteten sozialen Beziehungen entworfen (Guagnin 2019).
- ▶ **Soziale Gerechtigkeit:** „Alles, was wirkt, hat auch Nebenwirkungen“ (Guagnin 2019). Das bedeutet, dass sich Modellierungsannahmen und -praktiken auf verschiedene Betroffene unterschiedlich auswirken. Selbst wenn es also gut gemeint ist, ist es nicht unbedingt gut

gemacht - für alle Betroffenen und zwar gleichermaßen - unabhängig davon, ob es auf (ingenieurs-)technischer Ebene richtig ausgeführt ist (ebd.).

- ▶ **Legitimation von vorgefertigten Entscheidungen durch Modelle:** Auch die Gefahr, dass Modellierungen nur dazu verwendet werden, um schon vorgefertigte Meinungsbilder von Entscheidungsträger_innen oder Akteuren von subjektiven Modellierungen zu legitimieren, ist ein kritischer Punkt von Modellierungen im Politikberatungsprozess (Turnpenny 2008).
- ▶ **Manipulation und Angriffe auf die Menschenwürde:** Wie die OECD (2017) berichtet, wurden in einigen Ländern ethische Überlegungen in die Gestaltung von verhaltensbasierten politischen Maßnahmen schon einbezogen, und diese werden nur dann angewandt, wenn sie im Interesse der Gemeinschaft und der Bürger_innen sind und die Freiheit der Wahl sowie Authentizität respektieren. Nichtsdestotrotz sind politische Interventionen, die auf verhaltenswissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen und soziale Transformationen in eine bestimmte Richtung erzielen sollen, ethisch umstritten - es gibt Debatten darüber, wie der Einsatz von Verhaltensmodellierung und die darauf basierende Politikgestaltung als paternalistisch empfunden werden kann, die Autonomie beschränken und sogar die Menschenwürde missachten und als Manipulation empfunden werden können (Sunstein 2015; McCrudden 2015). In Deutschland kam es 2015 zu einer öffentlichen Diskussion in dieser Hinsicht, als der Bundestag über die Einbeziehung verhaltenswissenschaftlicher Erkenntnisse in die Politikgestaltung nachdachte (siehe z. B. Fragen an Bundestag 2015; oder Purnhagen 2015 für eine rechtliche Auseinandersetzung).
- ▶ Die **Auswahl an Daten** für Modellierungszwecke reicht von umfangreichen und zuverlässigen Daten aus traditionellen Erhebungsquellen, wie z. B. Fragebögen, bis hin zu den neu hinzukommenden massiven digitalen Datensätzen (im Sinne der *Data Science*), die von intelligenten Elektrogeräten sowie Smartphones, Datenprotokollen in sozialen Medien usw. stammen und immer häufiger erzeugt werden. Diese Datenmengen liefern unzählige Informationen und Erkenntnisse darüber, wie sich Menschen verhalten, wie sie miteinander interagieren und wie sie mit ihrer Umwelt umgehen (Bertoni 2022). Die verantwortungsvolle und legitime Nutzung von neuen Datenquellen und innovativen Verfahren zur Politikberatung ist eine der größten ethischen Herausforderungen im Bereich der computergestützten Politikmodellierung und Sozialwissenschaften. Wie ethisch wäre es, politische Interventionen auf der Grundlage von *Big Data* zu gestalten? Wie weit darf man dabei gehen? Und welche Vorschriften sind erforderlich, um eine ethisch angemessene Nutzung durch EU-Institutionen, Mitgliedstaaten und andere Akteure zu gewährleisten (Bertoni 2022)? In Anbetracht des breiten Spektrums an Modellierungsmethoden und -ansätzen, die in diesem Bericht erörtert werden, würden diese ethischen Bedenken vor allem auf die (semi-)quantitativen Methoden zutreffen, die große Datensätze verwenden. Wurden die Daten, die zur Verhaltensmodellierung für politische Zwecke genutzt werden, zuvor für einen anderen Zweck erhoben, dann stellt sich das Problem der Einverständniserklärung.
- ▶ Weitere ethische Fragen im Zusammenhang mit Big Data betreffen ihre **Zugänglichkeit und Transparenz**. Bei der Nutzung von *Big Data* für die Politikmodellierung stellt sich die Frage, wer die Daten bereitstellt und wer Zugang dazu hat. Die allgemeinen politischen Fragen in diesem Zusammenhang sind, wie man Monopolstellungen in Bezug auf Daten und Verarbeitungskapazitäten verhindert und wie man *Big Data* FAIR (*findable/auffindbar*, *zugänglich/accessible*, *interpretierbar/inter-operable* und *wiederverwendbar/re-usable*) macht (Bertoni 2022). Transparenz ist nicht nur in Bezug auf die verwendeten Daten von hoher Relevanz, sondern auch auf den gesamten Modellierungsprozess. Eine transparente Modellierung ist wichtig, um zu verstehen, wie die Modelle funktionieren, und um ihr Ergebnis

zu validieren. Dies wiederum fördert das Vertrauen in die Modelle und ihre solide und weit verbreitete Nutzung zur Unterstützung politischer Entscheidungen. Dennoch kann die Veröffentlichung von offenem Code bzw. Daten eine Herausforderung darstellen, z. B. aufgrund von Fragen des Dateneigentums, des Datenschutzes und Sicherheitsbedenken. Ein Gleichgewicht zwischen Datenschutz und Transparenz zu finden, ist in diesem Fall eine offene Frage (Süsser 2021; Acs 2019; McIntosh 2007).

- ▶ Eine weitere ethische Frage bezüglich Big Data betrifft die Ethik von durch **maschinelles Lernen** verwendeten Algorithmen. Beim maschinellen Lernen werden Algorithmen verwendet, um *Big Data* auszuwerten - es stellt sich jedoch die Frage, von wem dieser Prozess überwacht wird. Datengestützte Algorithmen können die Grenzen und Voreingenommenheit menschlicher Entscheidungsfindung wirksam ausgleichen und überwinden. Können sie allerdings auch fair und unvoreingenommen sein? Und wo liegen die Grenzen, wenn man die Analyse von menschlichen Systemen an Maschinen überträgt? (Bertoni 2022)
- ▶ Die ethischen Grenzen der Politikmodellierung sind nicht nur auf die Frage der Datenerhebung und -verarbeitung beschränkt. Sie beeinträchtigen auch den ursprünglichen **Zweck der Modellierung**. Die Bewertung der potenziellen Wirksamkeit künftiger politischer Maßnahmen und Instrumente mittels Modellierung kann entweder bei der Beschreibung mehrerer Alternativen bleiben, die zu verschiedenen Zukunftsvarianten führen, oder dazu beitragen, diejenigen Maßnahmen und Instrumente auszuwählen, die am wirksamsten zum angestrebten Ergebnis führen. Ob letztere mit den demokratischen Grundprinzipien vereinbar sind, muss immer kritisch hinterfragt werden (Süsser 2021).

5 Übertragbarkeit auf das Themenfeld der Anpassung an den Klimawandel

Die Recherche von Anwendungsbeispielen für die Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf das Verhalten von Akteuren mittels Modellierungsmethoden zeigte, dass Modellierungen im Politikfeld der Anpassung an den Klimawandel bisher nicht systematisch genutzt werden. Einige Bereiche, wie der Katastrophenschutz, Wassermanagement oder die Stärkung der Resilienz von sozio-ökologisch-technischen Systemen, adressieren Themenfelder der Klimaanpassung. Der Fokus der Modellierungen zur Wirksamkeitsbewertung von Politikinstrumenten liegt nach unserer Recherche jedoch bisher eher im Bereich Energie, Gesundheit, Verkehr und Wirtschaft. Generell sind jedoch Fragestellungen, die sich in diesen Politikbereichen stellen, auch für die Fragen der Klimaanpassung relevant und übertragbar. Entsprechend können Ansätze und Methodik teilweise direkt übertragen beziehungsweise in abgeänderter Form angewandt werden. So sind beispielsweise Modellierungen zu Fragen der Akteursakzeptanz von Innovationen, zu sektorenübergreifenden Auswirkungen von Instrumenten oder zu komplexen Entscheidungsprozessen für das Feld der Klimaanpassung nahezu direkt von bekannten Betrachtungen anderer Politikfelder übertragbar.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche von den identifizierten Modellierungsmethoden (siehe Kapitel 3) sich besonders für die Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten auf das Verhalten von Akteuren im Feld der Klimaanpassung eignet. Um diese Frage beantworten zu können, muss der Entwicklungsprozess näher beleuchtet werden, den ein Politikinstrument von der Idee bis zur Umsetzung durchläuft. Dieser startet bei der Problemidentifikation und der Analyse, welche konzeptuellen Politikinstrumente zur Zielerreichung beitragen können, dass eine (oder mehrere) Maßnahmen dieses Problem beheben. Dabei sind Politikinstrumente in diesem frühen Stadium noch stark konzeptuell und allgemein formuliert. Ein Beispiel für diesen Prozessschritt wäre, dass eine finanzielle Förderung als potenziell passfähiges Politikinstrument identifiziert wird, ohne dass spezifiziert wird, wie diese im Detail gestaltet und umgesetzt wird. In dieser *frühen, konzeptuellen Phase* sind **qualitative Modellierungs- und Konzeptualisierungsmethoden** hilfreich, vor allem aus dem weiten Bereich des Systemdenkens. Im weiteren Entwicklungsprozess erfolgt die Ausdifferenzierung und weitere Schärfung des Politikinstrumentes. Am genannten Beispiel der finanziellen Förderung wird in diesem Schritt herausgearbeitet, wie diese im Detail gestaltet werden soll, das heißt, welche Akteure sie unter welchen Randbedingungen in welcher Höhe erhalten sollen. Wesentlich ist hierbei, das richtige Maß der Förderung zu finden, dass Akteure motiviert und gleichzeitig Mitnahmeeffekte oder überzogene Förderungen vermieden werden. Zur Beantwortung solcher Fragen innerhalb dieser **detaillierteren Ausarbeitungsphase** von Politikinstrumenten eignen sich vor allem **quantitative Modellierungsmethoden**, welche die Systemdynamik abbilden und die Akteursperspektiven berücksichtigen. Dazu gehören System Dynamics, Agentenbasierte Modellierung, Zelluläre Automaten oder die integrierte Bewertungsmodellierung. Neben dieser Fokussierung auf die Bewertung der Wirksamkeit eines Politikinstrumentes, stellt sich generell die Frage, ob die Anwendung eines bestimmten Mixes bzw. Kombination von Politikinstrumenten die Wirkung beim Akteur maximiert und, falls dies der Fall ist, welche genauen Kombinationen dies sein könnten. Die Beantwortung dieser Frage stellt die größte Herausforderung innerhalb der Bewertung von Politikinstrumenten in ihrer Wirksamkeit dar, denn es müssen für die quantitative Bewertung ausreichend Informationen und Daten vorliegen, wie wirksam welches Politikinstrument ist sowie wie wirksam sie in Kombination mit verschiedenen Intensitäten sind. Wesentlich ist dabei, dass die Wechselwirkung der Politikinstrumente quantitativ gut in den Modellen erfasst ist. Hierfür geeignet sind prinzipiell ebenfalls die Ansätze der Agentenbasierten

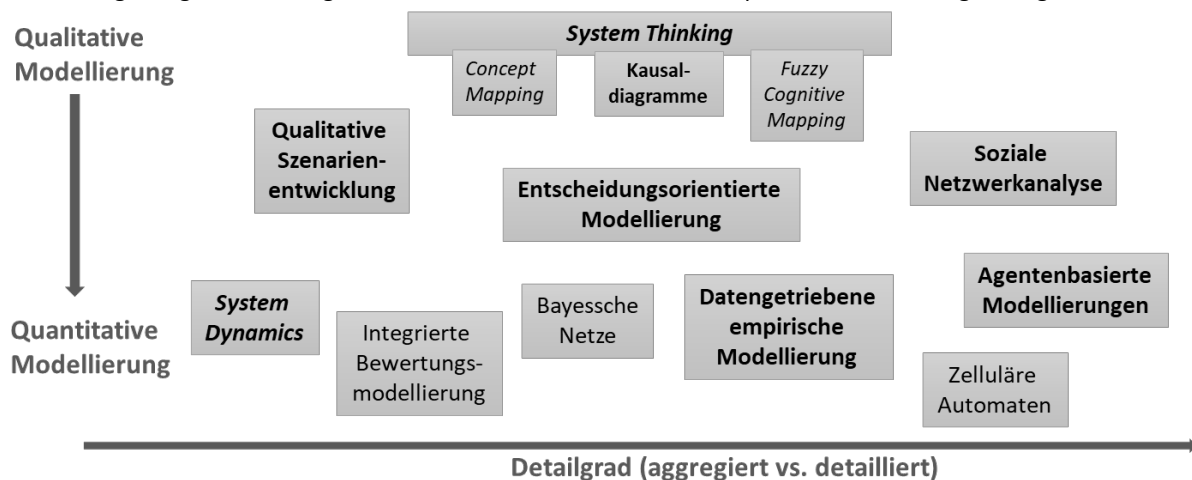
Modellierung und der *System Dynamics*. Die identifizierten semi-quantitativen Modellierungsmethoden sind innerhalb des gesamten Entwicklungsprozesses eines Politikinstrumentes zu spezifischen Fragestellungen von Bedeutung.

Methodenvergleich zur Wirksamkeitsprüfung von Politikinstrumenten am Beispiel der Förderung der urbanen Begrünung:

An einem konkreten Beispiel soll näher aufgezeigt werden, welche der in Kapitel 2 identifizierten Modellierungsmethoden für welche Fragestellungen innerhalb der Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten der Klimaanpassung in welchem Entwicklungsschritt des Politikinstrumentes geeignet sind. Hierfür sind in Abbildung 27 die in der Recherche identifizierten qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Modellierungsmethoden im Überblick dargestellt. Beim Beispiel handelt es sich um die Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten, welche die Begrünung des urbanen Raumes erhöhen sollen, um das Ziel der Reduktion der sommerlichen Hitzebelastung zu gewährleisten. Hierbei liegt der Fokus auf der Wirkung des Instrumentes auf das Akteursverhalten. Im Folgenden wird vorgestellt, welche Fragestellungen mit welcher Methodik untersucht werden können.

Abbildung 27: Überblick über die qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Modellierungsmethoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten mit Zuordnung, ob es sich eher um eine qualitative oder quantitative Modellierungsmethode handelt und diese Phänomene detailliert oder aggregiert betrachtet

Der Detailgrad gibt an, ob sich die Modellierungsmethode üblicherweise eher für aggregierte oder detaillierte Betrachtungen eignet. Die fettgedruckten Methoden werden am Beispiel der urbanen Begrünung diskutiert.



Quelle: eigene Darstellung, IÖR

a) Methoden zur qualitativen und semi-qualitativen Wirkanalyse von Politikinstrumenten in der konzeptuellen Entwicklungsphase

Systemdenken (System Thinking): Das komplexe System bzw. Problem wird qualitativ in einem Diagramm abgebildet und die kausalen Zusammenhänge identifiziert. Kausaldiagramme, als eine Methode des *System Thinking*, eignen sich zur Identifizierung möglicher Politikinstrumente und Prüfung, wo diese Politikinstrumente im Kausaldiagramm wirken. Somit ist eine qualitative und zugleich ganzheitliche (sektorenübergreifende) Wirksamkeitsprüfung der Instrumente möglich, bei denen auch Synergien und nicht-intendierte Nebeneffekte erfasst werden können. Da es sich um eine visuelle Modellierungsmethode handelt, kann *System Thinking* auch das Systemverständnis der am

Entwicklungsprozess des Politikinstrumentes Beteiligten verbessern. Da es sich eher um eine aggregierte Systembetrachtung handelt, ist diese Methode nur sehr beschränkt zur Analyse der Wirksamkeit auf individuelle Akteure geeignet. Am Beispiel der urbanen Begrünung gibt es die Möglichkeit, die interdisziplinären Auswirkungen von Politikinstrumenten zur Förderung der Begrünung zu analysieren, z. B. die Wirkung auf das Abwassersystem. Des Weiteren könnte analysiert werden, welche Dinge die Motivation von Akteuren beeinflussen, sich für mehr Begrünung ihrer Immobilie oder Grundstück zu entscheiden.

Qualitative Szenarienentwicklung: In partizipativen Prozessen und auf Grundlage umfassender Trendanalysen der Vergangenheit werden meist narrative Szenarien entwickelt, die aufzeigen, welche Zukünfte möglich sind. Am Beispiel der Stadtbegrünung wären zum Beispiel verschiedene Szenarien denkbar: Szenario A mit vorwiegend Dachbegrünung, Szenario B mit vorwiegend Fassadenbegrünung und als *Business-as-usual* (BAU) Szenario die Extrapolation des Stadtbegrünungstrends aus der Gegenwart in die Zukunft. Die Methode der qualitativen Szenarien eignet sich entsprechend eher zur Identifikation der gewünschten Zukunft. Darauf aufbauend kann qualitativ diskutiert werden, ob die angedachten Politikinstrumente hierfür geeignet sind. Szenarien eignen sich entsprechend nur indirekt zur Wirksamkeitsprüfung von Politikinstrumenten.

Entscheidungsmodellierung: Bei dieser Methode werden die verschiedenen Entwicklungspfade, die zu der Zielgröße eines Szenarios (z. B. vorheriges Szenario B mit vorwiegender Fassadenbegrünung) führen, analysiert. Die Implementation eines Politikinstrumentes stellt im Entwicklungspfad einen Punkt dar, an dem der Pfad den des BAU-Szenarios verlässt. Hierfür muss jedoch eher bekannt sein, welche Wirkung ein Politikinstrument auf die zukünftige Entwicklung der urbanen Begrünung hat. Die Methode dient auch dazu, evtl. mit zusätzlichen bzw. weiter entwickelten Politikinstrumenten nicht erwünschte Pfade auf dem Weg zum Szenarioziel zu umgehen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Entwicklungen der Zukunft hier vereinfacht in linearer Form abgebildet werden, was in Realität meist nicht der Fall ist. Die Methode eignet sich somit eher für eine schnelle Prüfung, mit welchen Instrumenten und Entscheidungen welche Pfade eingeschlagen werden als zur direkten Prüfung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf bestimmte Akteure.

Soziale Netzwerkanalyse: Diese Methode eignet sich zur Prüfung, in welchem Umfang und auf welche Art und Weise Akteure oder Akteursgruppen miteinander vernetzt sind, bei denen das Politikinstrument die Umsetzung der Maßnahme zur Stadtbegrünung bewirken soll. Entsprechend können wichtige Akteure bzw. Akteursgruppen identifiziert werden, für die das Politikinstrument in seiner Wirksamkeit maximiert werden soll. Es handelt sich bei dieser Evaluierung also eher darum, die besonders relevanten (d. h. gut vernetzten) Akteure zu identifizieren, um die Wirksamkeit eines Politikinstrumentes zu steigern, als die Wirksamkeit des Politikinstrumentes auf die Verhaltensänderung der Akteure zu analysieren. Die Methode eignet sich insofern sowohl qualitativ als auch quantitativ dafür, die relevanten Adressaten eines Politikinstrumentes zu identifizieren und die Wirkung über soziale Diffusionsprozesse auf andere Akteure zu streuen. Bei der urbanen Begrünung könnten dies städtische Grünflächenämter, Firmen der Grünpflege oder Investoren aus dem Bauwesen sein.

b) **Methoden zur quantitativen Wirkanalyse (Simulation) von Politikinstrumenten in der detaillierteren Ausarbeitungsphase**

Bei quantitativen Modellierungen stellt die Parametrisierung der Modelle durch eine ausreichend gute Datengrundlage die größte Herausforderung dar. Da diese Daten meist erst recherchiert, aufbereitet oder gar erhoben werden müssen, sind quantitative Methoden

üblicherweise wesentlich zeitaufwendiger als qualitative Methoden. Der Vorteil der quantitativen Modellierung ist jedoch, dass die Dynamik der Wirkung von Politikinstrumenten durch Simulationen analysiert werden kann und somit das schwer vorzustellende, nicht-lineare Systemverhalten (inklusive Hebel- und Kippunkten und nicht intendierter Nebeneffekte) abgebildet werden kann. Es muss dabei jedoch darauf geachtet werden, dass solche Systemmodellierungen meist nicht geeignet sind, genaue Zukunftsvorhersagen zu machen, wann sich das System wie verhält (Ursachen sind u. a. nicht vollständige Datengrundlagen und Ungewissheiten in der Zukunft). Vielmehr geht es darum, die Änderung des dynamischen Verhaltens des Systems durch die Einbeziehung von Politikinstrumenten zu verstehen und daraus (qualitative) Schlussfolgerungen zur Bewertung der Instrumente zu ziehen.

System Dynamics: Mit Hilfe dieser Simulationsmethode wird die Struktur des zu untersuchenden Systems, (meist) aufbauend auf einem qualitativen Kausaldiagramm, parametrisiert (Variablen und Verbindungen zwischen diesen). Ziel ist ein tiefes System- und Wirkungsverständnis auf der Grundlage, dass die Systemstruktur das Systemverhalten induziert. Mit dieser Methode können Auswirkung von Politikinstrumenten auf die nicht-lineare Dynamik komplexer Systeme und Probleme untersucht werden. Am Beispiel der urbanen Begrünung können Politikinstrumente in das bestehende System eingebunden werden und analysiert werden, wie diese die Dynamik des Systems beeinflussen. Zentral ist dabei, dass in nicht-linearen (komplexen) Systemen kleine Hebel große Wirkungen entfalten können. Andererseits können vermeintlich erfolgversprechende Politikinstrumente die Dynamik kaum ändern oder nicht vorhergesehene, negative Nebeneffekte auslösen. Genau darauf fokussiert sich die Methode *System Dynamics*, die jedoch eher die Wirkung von Politikinstrumenten auf die Systemdynamik erfasst und somit als *Top-Down-Ansatz* nicht akteursscharf ist und entsprechend Wechselwirkungen im Verhalten von Akteuren nur sehr begrenzt wiedergibt.

Agentenbasierte Modellierung: Im Gegensatz zu *System Dynamics* fokussiert ABM als *Bottom-Up-Modellierungsansatz* auf die Wechselwirkung von Akteuren oder Akteursgruppen. Dabei untersucht sie, ob sich durch deren Interaktion ein emergentes Systemverhalten ergibt, das man ohne die Berücksichtigung dieser Interaktionen nicht beobachten würde. Am Beispiel der urbanen Begrünung kann durch ABM die Frage beantwortet werden, wie sich ein Politikinstrument auf die Interaktionen und somit Handlungen der beteiligten Akteure im System auswirkt. Wie stark ist zum Beispiel der *Word-of-Mouth-Effekt* (Mundpropaganda) zwischen den Akteuren, und führt ein Politikinstrument zu einer deutlichen Verstärkung dieses Effektes und entsprechend einer deutlichen Erhöhung der dynamischen Entwicklung der urbanen Begrünung. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die benötigten Daten, die diese sozialen Interaktionen beschreiben, in guter Qualität vorliegen müssen, damit das Simulationsmodell eine gute Abbildung des realen Sozialverhaltens darstellt.

Datengetriebene, empirische Modellierung: Dies umfasst Modellierungsmethoden wie neuronale Netze, künstliche Intelligenz und *Big-Data* Analysen mit dem Ziel, einen empirischen, quantitativen Zusammenhang zwischen beobachteten Systemverhalten und Eingangsparametern zu erlangen. Dies geschieht über Mustererkennung und andere Verfahren zur Analyse großer Datenmengen. Bei rein empirischen Modellierungen gibt es die Limitierung, dass die Beziehungen zwischen Eingangs- und beobachteter Ausgangsgröße nicht wissenschaftlich erklärt sind, sondern eine Art Black-Box darstellen. Entsprechend kann man ein Systemverhalten auf diese Art und Weise zwar nachbilden, allerdings nicht

nachvollziehen, welche Systemstruktur das beobachtete Verhalten induziert. Am Beispiel der urbanen Begrünung könnte der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen, vorhandenen urbanen Quartieren und deren zeitliche Dynamik in der Begrünung analysiert und geprüft werden, ob es hier Muster und Interpretationen gibt. Die direkte Prüfung von Politikinstrumenten kann auf dieselbe Art geschehen.

c) **Kombination von Methoden**

Nur selten wird die Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf Akteure auf nur eine Methode beschränkt. Dies liegt daran, dass die meisten quantitativen (Simulations-)Modelle aus parametrisierten qualitativen Modellen hervorgehen, wie es zum Beispiel bei *System Dynamics* der Fall ist, das meist auf einem qualitativen Kausaldiagramm aufbaut. Zudem beinhalten die meisten quantitativen Modellierungen unterschiedliche Formen qualitativer Szenarien, um verschiedene Pfade zu prüfen. Auch eine Kombination quantitativer Modellierungsmethoden kann sehr sinnvoll sein. So könnte die Wirkung eines Politikinstrumentes auf die Dynamik der urbanen Begrünung in einem *System Dynamics* Simulationsmodell abgebildet werden, Fragestellungen der detaillierten Akteursinteraktion jedoch eher in einem agentenbasierten Modell. Ebenso kann die Parametrisierung von *System Dynamics* oder ABM Modellen durch empirische Modellierungsansätze der *Data Science* unterstützt werden. Ziel der Erläuterung der Anwendung der Modellierungsmethoden am Beispiel der urbanen Begrünung war es, aufzuzeigen, dass es von der Fragestellung abhängt, welche Methode zur Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf die Dynamik geeignet ist. Wie schon im Methodenkapitel erwähnt, ist es daher essentiell, dass am Anfang eines Modellierungsvorhabens genau definiert wird, welches problematische Systemverhalten untersucht werden soll. Hierfür eignen sich wiederum auch qualitative Methoden wie das System Thinking und generell der Ansatz der partizipatorischen Modellierung, wo relevante Stakeholder und Akteure in den (möglichst gesamten) Modellierungsprozess einbezogen werden. Dies erhöht nicht nur die Qualität und Glaubwürdigkeit des Modells, sondern fördert auch das gemeinsame Systemverständnis der beteiligten Akteure.

6 Quellenverzeichnis

- Acosta-Michlik, L., & Espaldon, V. (2008). Assessing vulnerability of selected farming communities in the Philippines based on a behavioural model of agent's adaptation to global environmental change. *Global Environmental Change*, 18(4), 554-563.
- Acs, S., Ostlaender, N., Listorti, G., Hradec, J., Hardy, M., Smits, P., & Hordijk, L. (2019). Modelling for EU Policy support: impact assessments. Technical report, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Adelle, C., & Weiland, S. (2012a). Policy assessment: the state of the art. *Impact assessment and project appraisal*, 30(1), 25-33.
- Adelle, C., Jordan, A., & Turnpenny, J. (2012b). Proceeding in parallel or drifting apart? A systematic review of policy appraisal research and practices. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 30(3), 401-415.
- AIT: Austrian Institute of Technology GmbH. (o. D.). Project KNOWING. Europäische Union. Horizon 2020 research and innovation programme. [online] in: <https://knowing-climate.eu/> [abgerufen am 17 Juli 2022].
- Ajzen, I. (1991). Organizational behavior and human decision processes. *Theory Plann. Behav.* 50, 179–211. doi: 10.1016/0749-5978(91)90020-T
- Al-Amin, S., Berglund, E. Z., & Larson, K. L. (2014). Complex Adaptive System Framework to Simulate Adaptations of Human-Environmental Systems to Climate Change and Urbanization: The Verde River Basin. In *World Environmental and Water Resources Congress 2014* (pp. 1819-1825).
- Bach, M., Tustanovski, E., Ip, A. W., Yung, K. L., & Roblek, V. (2019). System dynamics models for the simulation of sustainable urban development: A review and analysis and the stakeholder perspective. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics*, 49(2), 460-504.
- Badham, J. (2010). A compendium of modelling techniques.
- Badham, J. (2015). Functionality, accuracy, and feasibility: talking with modelers. *Journal on Policy and Complex Systems*, 1(2), 60-87.
- Bammer, G. (2013). Disciplining interdisciplinarity: Integration and implementation sciences for researching complex real-world problems. ANU Press.
- Ben-Gal, I. (2007). Bayesian Networks. In *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*.
- Benenson, I., & Torrens, P. (2004). *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. John Wiley & Sons.
- Bertoni E., Fontana M., Gabrielli L., Signorelli S., Vespe M. (editors). (2022). Mapping the demand side of Computational Social Science for Policy. EUR 31017 EN. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- Binder, T., Vox, A., Belyazid, S., Haraldsson, H., & Svensson, M. (2004). Developing system dynamics models from causal loop diagrams. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamic Society*
- Borsuk, M. E., Reichert, P., Peter, A., Schager, E., & Burkhardt-Holm, P. (2006). Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling*, 192(1–2), 224–244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.006>
- Brailsford, S. C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., & Osorio, A. F. (2019). Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 721-737.
- Brown, C., Alexander, P., Holzhauer, S., & Rounsevell, M. D. (2017). Behavioral models of climate change adaptation and mitigation in land-based sectors. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(2), e448.
- Browne, J., Coffey, B., Cook, K., Meiklejohn, S., & Palermo, C. (2019). A guide to policy analysis as a research method. *Health promotion international*, 34(5), 1032-1044.

Brüning, H.; Gómez, J.M.; Papke, A.; Kokkarachedu, S. Mobilitätswende @ Lebensqualität (MobiLe) – Die Entwicklung eines qualitativen Modells zur Vermittlung wichtiger Wirkungszusammenhänge im komplexen System Verkehr. *INFORMATIK 2022*, 2022, 795-805, doi:10.18420/inf2022_67.

Candy, S., Biggs, C., Larsen, K., & Turner, G. (2015). Modelling food system resilience: a scenario-based simulation modelling approach to explore future shocks and adaptations in the Australian food system. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(4), 712-731. Kotir 2017

Candy, S., Biggs, C., Larsen, K., & Turner, G. (2015). Modelling food system resilience: a scenario-based simulation modelling approach to explore future shocks and adaptations in the Australian food system. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(4), 712-731.

City of Boston (2010). Participatory Chinatown. [online] in: <https://www.boston.gov/departments/new-urban-mechanics/participatory-chinatown> [abgerufen am 10 November 2022].

Clarke, K. C. (2003). Geocomputation's future at the extremes: high performance computing and nanoclients. *Parallel Computing*, 29(10), 1281-1295.

Climate Interactive (o.D.) The En-ROADS Climate Solutions Simulator. [online] in: <https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html> [abgerufen am 5 Juni 2022].

Coletti, P., Libin, P., Petrof, O., Willem, L., Abrams, S., Herzog, S. A., ... & Hens, N. (2021). A data-driven metapopulation model for the Belgian COVID-19 epidemic: assessing the impact of lockdown and exit strategies. *BMC infectious diseases*, 21(1), 1-12.

Conte, R., Gilbert, N., Bonelli, G., Cioffi-Revilla, C., Deffuant, G., Kertesz, J., ... Sanchez, A. (2012). Manifesto of computational social science. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 325-346.

Coyle, R.G. (2000). Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *Syst Dyn Rev* 16(3):225–244

Craik, K.J.W. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge University Press, Cambridge

Crooks, A., Castle, C., & Batty, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 417-430.

CSIRO. (2019a). Integrated Management Plan for Water Resources for the Rapel Basin (Stage I). *Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca de Rapel* [online] in: <https://research.csiro.au/gestionrapel/en/proyectos-integrated-management-plan-for-water-resources-for-the-rapel-basin-stage-i/> [abgerufen am 9 Juli 2022].

CSIRO. (2019b). SimRapel: Participatory modelling for water governance - Stage II. *Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca de Rapel* [online] in: <https://research.csiro.au/gestionrapel/en/projects-simrapel-participatory-modeling-for-water-governance> [abgerufen am 10 Juli 2022].

Darnton, A. (2008). Reference Report: An overview of behaviour change models and their uses. GSR: Behaviour Change Knowledge Review. London, Centre for Sustainable Development, University of Westminster.

Davies, M. (2011). Concept mapping, mind mapping and argument mapping: what are the differences and do they matter? *Higher education*, 62(3), 279-301.

De Boer, H. W., van Elk, R. & Verkade, E. (2020). MICSIM 2.0 - A behavioural microsimulation model for the analysis of tax-benefit reforms in the Netherlands: an updated version. CPB Background Document.

De Ridder, W., Turnpenny, J., Nilsson, M., & Von Raggamby, A. (2007). A framework for tool selection and use in integrated assessment for sustainable development. In *tools, techniques and approaches for sustainability: Collected writings in environmental assessment policy and management* (pp. 125-143).

De Ruig, L. T., Haer, T., de Moel, H., Orton, P., Botzen, W. W., & Aerts, J. C. (2022). An agent-based model for evaluating reforms of the National Flood Insurance Program: A benchmarked model applied to Jamaica Bay, NYC. *Risk Analysis*.

DEFRA. (2013). Impact Assessment: Future Water Resources Management: Reform of the Water Abstraction Regulation System. UK government. [online] in: https://consult.defra.gov.uk/water/abstraction-reform/supporting_documents/abstractionreformconsultannexa20131217.pdf [abgerufen am 5 Juli 2022].

DEFRA. (2014). Meeting note: Abstraction Reform Advisory Group 5 November 2014. UK Government: Abstraction Reform Advisory Group. [online] in: http://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/441335/ar-ag-minutes-141105.pdf [abgerufen am 5 Juli 2022].

DEFRA. (2015). Impact Assessment: New Authorisations for water abstraction. UK government. [online] in: https://consult.defra.gov.uk/water/water-abstraction-licensing-exemptions/supporting_documents/Annex%20D%20%20Consultation%20Impact%20Assessment%20for%20New%20Authorisations.pdf [abgerufen am 5 Juli 2022].

Dempwolf, C. S., & Lyles, L. W. (2012). The uses of social network analysis in planning: A review of the literature. *Journal of Planning Literature*, 27(1), 3-21.

Diallo, S. Y., Shults, F. L., & Wildman, W. J. (2021). Minding morality: ethical artificial societies for public policy modeling. *Ai & Society*, 36(1), 49-57.

Dreyer, I., & Stang, G. (2013). Foresight in governments—practices and trends around the world. *Yearbook of European Security*, 1368, 1-26.

Eden, C., & Ackermann, F. (2004). Cognitive mapping expert views for policy analysis in the public sector. *European Journal of Operational Research*, 152(3), 615-630.

Epstein, J. M. (2008). Why model? *Journal of artificial societies and social simulation*, 11(4), 12.

Estrada, M. A. R., & Yap, S. F. (2013). The origins and evolution of policy modeling. *Journal of Policy Modeling*, 35(1), 170-182.

European Commission (2014). TREMOVE: an EU-wide transport model. Archived on 01.01.2014. [online] in: <https://ec.europa.eu/environment/archives/air/models/tremove.htm> [abgerufen am 30 Mai 2022].

European Commission (2020). New research projects on Coronavirus. Research and innovation. [online] in: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/health/coronavirus/coronavirus-projects_en [abgerufen am 15 Juni 2022].

European Commission (2021). EU research and innovation in action against the coronavirus: funding, results and impact. Directorate General for Research and Innovation. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/734565>

European Environment Agency (EEA) (2009). Looking back on looking forward: A review of evaluative scenario literature. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

European Environmental Agency (EEA) (2016). Environment and climate policy evaluation. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2800/68508>

Ford, A. (2000). Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 1(1).

FORECAST. (o.D.) Die zukünftige Entwicklung der Energienachfrage. [online] in: https://www.forecast-model.eu/forecast-wAssets/docs/factsheets/forecast_entwicklung_energienachfrage.pdf [abgerufen am 15 Juli 2022].

- Fuentes, M. A., Tessone, C. J., & Furtado, B. A. (2019). Public policy modeling and applications. In (Vol. 2019): Hindawi.
- Furtado, B. A., Fuentes, M. A., & Tessone, C. J. (2019). Policy modeling and applications: state-of-the-art and perspectives. Complexity, 2019.
- Gerst, M. D., Wang, P., Roventini, A., Fagiolo, G., Dosi, G., Howarth, R. B., & Borsuk, M. E. (2013). Agent-based modeling of climate policy: An introduction to the ENGAGE multi-level model framework. Environmental modelling & software, 44, 62-75.
- Giabbanelli, P. J., Voinov, A. A., Castellani, B., & Törnberg, P. (2019). Ideal, best, and emerging practices in creating artificial societies. 2019 Spring Simulation Conference (SpringSim)
- Gilbert, N., Ahrweiler, P., Barbrook-Johnson, P., Narasimhan, K. P., & Wilkinson, H. (2018). Computational modelling of public policy: Reflections on practice. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 21(1).
- Giuliani, M., Li, Y., Castelletti, A., & Gandolfi, C. (2016). A coupled human-natural systems analysis of irrigated agriculture under changing climate. Water Resources Research, 52(9), 6928-6947
- Gordon, E., & Schirra, S. (2011). Playing with empathy: digital role-playing games in public meetings. In Proceedings of the 5th International Conference on Communities and Technologies (pp. 179-185).
- GOV.UK. (2020). The MacKay Carbon Calculator. Government Office for Science. Department for Business, Energy & Industrial Strategy [online] in: <https://www.gov.uk/guidance/carbon-calculator> [abgerufen am 15 November 2022].
- GOV.UK. (2022a). Systems thinking: case study bank. Government Office for Science. [online] in: <https://www.gov.uk/government/publications/systems-thinking-for-civil-servants/case-studies#case-study-13> [abgerufen am 18 Juni 2022].
- Greco, S., Figueira, J., & Ehrgott, M. (2016). Multiple criteria decision analysis (Vol. 37). Springer.
- Greenberger, M., Crenson, M. A., & Crissey, B. L. (1976). Models in the policy process: Public decision making in the computer era. Russell Sage Foundation.
- Guagnin, D., & Pohle, J. (2019). Welt→ Modell→ Technik→ Welt'. Grundrisse eines Frameworks zur Analyse und Kritik der Modellifizierung und Einschreibung von Machtmustern in soziotechnische Systeme. Flif-Kommunikation, 1, 14-18.
- Guzman, L. A., Escobar, F., Peña, J., & Cardona, R. (2020). A cellular automata-based land-use model as an integrated spatial decision support system for urban planning in developing cities: The case of the Bogotá region. Land use policy, 92, 104445.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & Ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. Global environmental change, 23(2), 485-498.
- Hansen, P. G. (2019). Tools and ethics for applied behavioural insights: the BASIC toolkit. Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD.
- Hare, M., & Deadman, P. (2004). Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. Mathematics and computers in simulation, 64(1), 25-40.
- Harrison, G., Thiel, C., Jones, L. (2016). Powertrain Technology Transition Market Agent Model (PTTMAM): An Introduction. JRC Publications Repository. EUR 27740. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union. JRC100418 [online] in: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100418> [abgerufen am 30 Mai 2022].

- Herrera de Leon, H. J., & Kopainsky, B. (2019). Do you bend or break? System dynamics in resilience planning for food security. *System Dynamics Review*, 35(4), 287-309.
- HM Government (2011). 2050 Pathways Analysis: Response to the Call for Evidence. [online] in: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/42563/1343-2050-pathways-analysis-response-pt1.pdf [abgerufen am 5 Juni 2022].
- HM Treasury, U. G. (2013). Review of quality assurance of Government analytical models: Final Report.
- Hodges, J. S., & Dewar, J. A. (1992). Is it you or your model talking?: A framework for model validation. In: Rand Santa Monica, CA.
- Hovmand, P. S. (2014). Group model building and community-based system dynamics process. In *Community based system dynamics* (pp. 17-30). Springer.
- Huber, R., Bakker, M., Balmann, A., Berger, T., Bithell, M., Brown, C., ... & Finger, R. (2018). Representation of decision-making in European agricultural agent-based models. *Agricultural systems*, 167, 143-160
- Jensen, F. V. (1996). An introduction to Bayesian networks (Vol. 210). UCL press London.
- Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). Bayesian networks and decision graphs (Vol. 2). Springer.
- Jetter, A. J. (2006). Fuzzy cognitive maps for engineering and technology management: what works in practice? 2006 Technology Management for the Global Future-PICMET 2006 Conference
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Econometrica* 47:14185. doi: 10.2307/1914185
- Kelly, R. A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., ElSawah, S., Hamilton, S. H., ... Rizzoli, A. E. (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental modelling & software*, 47, 159-181.
- Klepac, P., Kucharski, A. J., Conlan, A. J., Kissler, S., Tang, M. L., Fry, H., & Gog, J. R. (2020). Contacts in context: large-scale setting-specific social mixing matrices from the BBC Pandemic project. *MedRxiv*.
- Köhler, J., De Haan, F., Holtz, G., Kubezko, K., Moallemi, E., Papachristos, G., & Chappin, E. (2018). Modelling sustainability transitions: an assessment of approaches and challenges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(1).
- Kokkinos, K., Lakioti, E., Papageorgiou, E., Moustakas, K., & Karayannis, V. (2018). Fuzzy cognitive map-based modeling of social acceptance to overcome uncertainties in establishing waste biorefinery facilities. *Frontiers in Energy Research*, 112.
- Kolkman, D. (2020). The usefulness of algorithmic models in policy making. *Government Information Quarterly*, 37(3), 101488.
- Kolkman, D. A., Campo, P., Balke-Visser, T., & Gilbert, N. (2016). How to build models for government: Criteria driving model acceptance in policymaking. *Policy Sciences*, 49(4), 489-504.
- Kolleck, N. (2013). Social network analysis in innovation research: using a mixed methods approach to analyze social innovations. *European Journal of Futures Research*, 1(1), 1-9.
- Krebs, F. (2017). Heterogeneity in individual adaptation action: Modelling the provision of a climate adaptation public good in an empirically grounded synthetic population. *Journal of Environmental Psychology*, 52, 119-135.
- Kucharski, A. J., Klepac, P., Conlan, A. J., Kissler, S. M., Tang, M. L., Fry, H., ... & Simons, D. (2020). Effectiveness of isolation, testing, contact tracing, and physical distancing on reducing transmission of SARS-CoV-2 in different settings: a mathematical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*

- Kuikka, S., Vanhatalo, J., Pulkkinen, H., Mäntyniemi, S., & Corander, J. (2014). Experiences in Bayesian inference in Baltic salmon management. *Statistical Science*, 29(1), 42-49. DOI: 10.1007/978-3-030-28954-6
- Kurz, S., De Gersem, H., Galetzka, A., Klaedtke, A., Liebsch, M., Loukrezis, D., . . . Schmidt, M. (2022). Hybrid modeling: towards the next level of scientific computing in engineering. *Journal of Mathematics in Industry*, 12(1), 1-12.
- Lehikoinen, A., Jaatinen, K., Vähätalo, A. V., Clausen, P., Crowe, O., Deceuninck, B., Hearn, R., Holt, C. A., Hornman, M., Keller, V., Nilsson, L., Langendoen, T., Tománková, I., Wahl, J., & Fox, A. D. (2013). Rapid climate driven shifts in wintering distributions of three common waterbird species. *Global Change Biology*, 19(7), 2071–2081. <https://doi.org/10.1111/gcb.12200>
- Lord, B., Zechman, E., & Arumugam, S. (2013). A Complex Adaptive System Approach Assessing the Dynamics of Population Growth, Land Use, and Climate Change for Urban Water Resources Management. In *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future* (pp. 2843-2848)
- Maçaira, P., Elsland, R. et al. (2020): Forecasting residential electricity consumption: a bottom-up approach for Brazil by region, *Energy Efficiency*, Springer, DOI 10.1007/s12053-020-09860-w.
- Max von Grafenstein, L. L., Hölzel, J., Irgmaier, F., Pohle, J., Klug, K., & Prinz, D. (2018) Nudging: Regulierung durch Big Data und Verhaltenswissenschaften. *ABIDA-ASSESSING BIG DATA*.
- McCrudden, C. (2015). Nudging and human dignity, *VerfBlog*, 2015/1/06, <https://verfassungsblog.de/nudging-human-dignity-2/>, DOI: 10.17176/20181005-151150-0.
- McIntosh, B. S., Seaton, R. A., & Jeffrey, P. (2007). Tools to think with? Towards understanding the use of computer-based support tools in policy relevant research. *Environmental Modelling & Software*, 22(5), 640-648.
- Mietzner, D. (2009). *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen: Methodenevaluation und neue Ansätze*. Springer-Verlag.
- Mirzaei, A., & Zibaei, M. (2021). Water Conflict Management between Agriculture and Wetland under Climate Change: Application of Economic-Hydrological-Behavioral Modelling. *Water Resources Management*, 35(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02703-4>
- Mischen, P. A., & Jackson, S. K. (2008). Connecting the dots: Applying complexity theory, knowledge management and social network analysis to policy implementation. *Public Administration Quarterly*, 314-338.
- Moon, T. H., Kim, D. H., Park, C. S., & Lee, D. S. (2017). Policy analysis to reduce climate change-induced risks in urban and rural areas in Korea. *Sustainability*, 9(4), 524.
- NATSEM: National Centre For Social And Economic Modelling. (o. D.). STINMOD+ Overview. University of Canberra. [online] in: https://stinmod.canberra.edu.au/research/stinmodplus/model_doc/overview [abgerufen am 21 Juni 2022].
- Nilsson, M., Jordan, A., Turnpenny, J., Hertin, J., Nykvist, B., & Russel, D. (2008). The use and non-use of policy appraisal tools in public policy making: an analysis of three European countries and the European Union. *Policy Sciences*, 41(4), 335-355.
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2006). The theory underlying concept maps and how to construct them. *Florida Institute for Human and Machine Cognition*, 1(1), 1-31.
- Obracht-Prondzyńska, H., Duda, E., Anacka, H., & Kowal, J. (2022). Greecoin as an AI-Based Solution Shaping Climate Awareness. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11183.
- OECD (2017). *Behavioural Insights and Public Policy: Lessons from Around the World*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264270480-en>.

- Özesmi, U., & Özesmi, S. L. (2004). Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological modelling*, 176(1-2), 43-64.
- Papageorgiou, E. I., & Salmeron, J. L. (2012). A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 21(1), 66-79.
- Parry, H. R., Topping, C. J., Kennedy, M. C., Boatman, N. D., & Murray, A. W. (2013). A Bayesian sensitivity analysis applied to an Agent-based model of bird population response to landscape change. *Environmental Modelling & Software*, 45, 104-115.
- Podhora, A., Helming, K., Adenäuer, L., Heckelei, T., Kautto, P., Reidsma, P., ... Jansen, J. (2013). The policy-relevancy of impact assessment tools: Evaluating nine years of European research funding. *Environmental Science & Policy*, 31, 85-95.
- Prouty, C., Mohebbi, S., & Zhang, Q. (2020). Extreme weather events and wastewater infrastructure: A system dynamics model of a multi-level, socio-technical transition. *Science of the Total Environment*, 714, 136685.
- Purnhagen, K., & Reisch, L. A. (2015). 'Nudging Germany'? Herausforderungen Für Eine Verhaltensbasierte Regulierung in Deutschland. *Zeitschrift für Europäisches Privatrecht*, 630-654.
- Risk Solutions (2022). Water Abstraction Reform. [online] in: <https://risksol.co.uk/portfolio/water-abstraction-reform> [abgerufen am 8 July 2022].
- Ritchey, T. (2012). Outline for a morphology of modelling methods. *Acta Morphologica Generalis AMG Vol*, 1(1), 1012.
- Rogers, W. R. (1983). "Cognitive and psychological processes in fear appeals and attitude change: a revised theory of protection motivation," in *Social Psychophysiology: A Sourcebook*, eds J. Cacioppo and R. Petty (New York, NY: Guilford Press), 153–176. Available online at: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10004535663>
- Ruiz Estrada, M. (2019). The Application of Artificial Intelligence in Policy Modeling. 10.13140/RG.2.2.27173.45287/3.
- Samek, W., Montavon, G., Vedaldi, A., Hansen, L. K., & Müller, K.-R. (2019). Explainable AI: interpreting, explaining and visualizing deep learning (Vol. 11700). Springer Nature.
- Samek, W., Montavon, G., Vedaldi, A., Hansen, L. K., & Müller, K.-R. (Eds.). (2019). Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning (Vol. 11700). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28954-6>
- Schlüter, M., Baeza, A., Dressler, G., Frank, K., Groeneveld, J., Jager, W., et al. (2017). A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of social-ecological systems. *Ecol. Econ.* 131, 21–35. doi: 10.1016/j.ecolecon.2016.08.008
- Schlüter, M., Baeza, A., Dressler, G., Frank, K., Groeneveld, J., Jager, W., ... & Wijermans, N. (2017). A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of social-ecological systems. *Ecological economics*, 131, 21-35.
- Schrieks, T., Botzen, W.J.W., Wens, M., Haer, T., & Aerts, J.C.J.H. (2021). Integrating Behavioral Theories in Agent-Based Models for Agricultural Drought Risk Assessments. *Front. Water* 3:686329. doi: 10.3389/frwa.2021.686329
- Schünemann, C., Sidorova, A., Gkini, C., & Kopainsky, B. (2021). Using system dynamics modelling to analyse the interplay of policies and societal motivation for promoting energetic renovation. In *Proceedings of the 2021 System Dynamics Conference, Virtually Chicago, USA, July 26-30 2021*. System Dynamic Society, 1-30, 2021.
- Scott, R. (2018). Group model building: Using systems dynamics to achieve enduring agreement. Springer.

- Seligman, J. S. (2012). Simulation Design for Policy Audiences: Informing Decision in the Face of Uncertainty. In *Simulation for Policy Inquiry* (pp. 17-34). Springer.
- Siebers, P. O., Lim, Z. E., Figueredo, G. P., & Hey, J. (2020). An innovative approach to multi-method integrated assessment modelling of global climate change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(1).
- Sirenko, M., Yap, J.R., Sarva, S., Verbraeck, A., Comes, T. (2020). D2.1 - Local behavioural model and recommendations for local COVID-19. Health Emergency Response in Interconnected Systems. [online] in: <https://www.heros-project.eu/output/deliverables/> [abgerufen am 04 Juni 2022].
- Sterman, J. (2002). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.
- Sunstein, C. R. (2015). Nudging and choice architecture: Ethical considerations. *Yale Journal on Regulation*, Forthcoming.
- Süsser, D., Ceglaz, A., Gaschnig, H., Stavarakas, V., Flamos, A., Giannakidis, G., & Lilliestam, J. (2021). Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact. *Energy Research & Social Science*, 75, 101984.
- Tobler, W. R. (1979). Cellular geography. In *Philosophy in geography* (pp. 379-386). Springer.
- Torrens, P. M. (2006). Simulating sprawl. *Annals of the Association of American Geographers*, 96(2), 248-275.
- Transport & Mobility Leuven NV (TML) (o. D.). TREMOVE. [online] in: <https://www.tmlleuven.be/en/navigation/TREMOVE> [abgerufen am 30 Mai 2022].
- Trochim, W. M., & Cabrera, D. (2005). The complexity of concept mapping for policy analysis. *Emergence: Complexity & Organization*, 7(1).
- Trochim, W. M., Milstein, B., Wood, B. J., Jackson, S., & Pressler, V. (2004). Setting objectives for community and systems change: an application of concept mapping for planning a statewide health improvement initiative. *Health promotion practice*, 5(1), 8-19.
- Turnpenny, J., Nilsson, M., Russel, D., Jordan, A., Hertin, J., & Nykvist, B. (2008). Why is integrating policy assessment so hard? A comparative analysis of the institutional capacities and constraints. *Journal of Environmental Planning and management*, 51(6), 759-775.
- Turnpenny, J., Radaelli, C. M., Jordan, A., & Jacob, K. (2009). The policy and politics of policy appraisal: emerging trends and new directions. *Journal of European Public Policy*, 16(4), 640-653.
- Ulli-Beer, S., Gassmann, F., Bosshardt, M., & Wokaun, A. (2010). Generic structure to simulate acceptance dynamics. *System Dynamics Review*, 26(2), 89-116.
- Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., et al. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nat. Geosci.* 9, 89–91. doi: 10.1038/ngeo2646
- Vennix, J. (1996). *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using System Dynamics* In: Chichester: John Wiley & Sons.
- Voinov, A., & Shugart, H. H. (2013). 'Integronsters', integral and integrated modeling. *Environmental Modelling & Software*, 39, 149-158.
- Voinov, A., Jenni, K., Gray, S., Kolagani, N., Glynn, P. D., Bommel, P., ... Jordan, R. (2018). Tools and methods in participatory modeling: Selecting the right tool for the job. *Environmental Modelling & Software*, 109, 232-255.
- Volkery, A., & Ribeiro, T. (2009). Scenario planning in public policy: Understanding use, impacts and the role of institutional context factors. *Technological forecasting and social change*, 76(9), 1198-1207.
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior* (2nd rev. ed). Princeton, NY: Princeton University Press

- Vonk, G., Geertman, S. (2008). Improving the Adoption and Use of Planning Support Systems in Practice. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 1, 153-173, doi:10.1007/s12061-008-9011-7.
- Wens, M., Veldkamp, T. I., Mwangi, M., Johnson, J. M., Lasage, R., Haer, T., & Aerts, J. C. (2020). Simulating small-scale agricultural adaptation decisions in response to drought risk: an empirical agent-based model for semi-arid Kenya. *Frontiers in water*, 2, 15.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and planning A*, 25(8), 1175-1199. Wiley & Sons.
- Wu, L., Elshorbagy, A., & Alam, M. S. (2022). Dynamics of water-energy-food nexus interactions with climate change and policy options. *Environmental Research Communications*, 4(1), 015009.
- Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. I. (2021). Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106515.
- Yang, A., Martin, E., & Morris, J. (2011). Identification of semi-parametric hybrid process models. *Computers & chemical engineering*, 35(1), 63-70.
- Yurrita, M., Grignard, A., Alonso, L., Zhang, Y., Jara-Figueroa, C. I., Elkatsha, M., & Larson, K. (2021). Dynamic urban planning: an agent-based model coupling mobility mode and housing choice. Use case Kendall square. In *Intelligent Computing* (pp. 940-951). Springer, Cham.