

CLIMATE CHANGE

32/2024

**Abschlussbericht**

# **Machbarkeitsstudie: Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit**

**Qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur  
Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten**

**von:**

Dr. Christoph Schünemann, Elena Reger, Dr. Hendrik Herold  
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. Dresden

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



CLIMATE CHANGE 32/2024

AA-Forschungsplan des Auswärtigen Amtes

Forschungskennzahl 3721 48 104 0

FB001452

Abschlussbericht

# **Machbarkeitsstudie: Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit**

Qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten

von

Dr. Christoph Schünemann, Elena Reger, Dr. Hendrik Herold

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.  
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](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

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

### Abschlussdatum:

März 2024

### Redaktion:

Fachgebiet I 1.6  
Natalia Garcia Soler, Andreas Vetter, Thomas Abeling

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, August 2024

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

**Kurzbeschreibung: Machbarkeitsstudie: Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit – Qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten**

Politikinstrumente und Maßnahmen werden in der Politikberatung üblicherweise in ihrer ökonomischen oder physikalischen Wirkung mit einer Vielzahl von Ansätzen bewertet. Die komplexen, teilweise auch vielseitigen sozialen Auswirkungen von Instrumenten und Maßnahmen einzuschätzen, wird meist Expert\*innen überlassen. Dies ist insofern kritisch, da die Einschätzung der Auswirkung von Politikinstrumenten auf komplexe Systeme wie der Klimaanpassung inter- und transdisziplinäres, vielseitiges Systemwissen erfordert. Zudem sind solche komplexen Systeme nicht linear in ihrem realen zeitlichen Verlauf, was übliche vereinfachte Bewertungsansätze annehmen. Um die komplexe Wirkung von Politikinstrumenten besser zu berücksichtigen, sind Systemmodellierungsansätze ein geeignetes Mittel. Die Machbarkeitsstudie des Umweltbundesamtes „Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit“ zielte darauf ab zu analysieren, welche Methoden der Systemmodellierung sich für die Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten eignen und deren Anwendungsmöglichkeiten im Feld der Politikberatung zu prüfen. Dabei stellte sich als sinnvoll heraus, zwischen qualitativen Modellierungsansätzen, wie dem des Systems Thinking, und quantitativen Ansätzen, wie System Dynamics oder agentenbasierter Modellierung, zu unterscheiden. Während erstere sich aufgrund ihrer qualitativen Informationen und Daten zur Erfassung eignen, wie und wo Politikinstrumente in komplexen Systemen wirken, ermöglichen quantitative Simulationsmodelle einen tieferen Einblick in mögliche zukünftige Systemdynamiken, jedoch mit dem Nachteil, dass sie aufwendig quantifiziert werden müssen. Ihre Anwendungsfelder in der Politikberatung sehen wir daher sehr unterschiedlich, abhängig von deren diskutierten Chancen und Limitierungen. Um dies an einem Beispiel zu verdeutlichen, haben wir Testmodelle für die Methoden Systems Thinking, System Dynamics und agentenbasierte Modellierung zu einem Klimaanpassungsthema entwickelt und die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Analyse der komplexen Wirkung von Politikinstrumenten miteinander verglichen. Das entwickelte Konzept stellt die Erkenntnisse aus Recherche, Testmodellentwicklung und Expert\*inneneinschätzung zur Anwendung von Systemmodellen dar. Zentral ist dabei der entwickelte übliche Entwicklungsprozess von Systemmodellen. Das Factsheet dient dem Wissenstransfer zur Stärkung der Anwendung von Systemmodellierungen in der Politikberatungspraxis, um zukünftig die komplexen und sozialen Wirkungen von Politikinstrumenten besser berücksichtigen zu können.

**Abstract: Modeling climate adaptation measures: actors, decisions and effectiveness - Qualitative and quantitative system modelling approaches to analyse the efficacy of policies.**

In policy advice, policy instruments and measures are usually assessed in terms of their economic or physical impact using a variety of approaches. However, it is usually left to experts to assess the complex and sometimes diverse social impacts of policies. This is in general critical because assessing the impact of policies on complex systems such as climate change adaptation requires interdisciplinary and transdisciplinary, multifaceted knowledge. In addition, such complex systems are non-linear in their temporal progression, which is often assumed by the usual simplified assessment approaches. In this context, system modelling approaches are a suitable means of taking better account of the complex effects of policies. The feasibility study "Modelling climate adaptation measures: actors, decisions and effectiveness" founded by the Federal Environment Agency aims to analyse which system modelling methods are suitable for analysing the impact of policies and to examine their possible applications in the field of policy advice. In this regard, it makes sense to distinguish between qualitative modelling approaches, such as Systems Thinking, and quantitative approaches, such as System Dynamics or Agent-based modelling. While the former is suitable for understanding how and where policies work in complex systems due to their qualitative information and data, quantitative simulation models allow a deeper insight into possible future system dynamics, but with the disadvantage that they have to be quantified at great expense. We therefore see their fields of application in policy advice as very different, depending on their opportunities and limitations discussed. To illustrate this, we developed test models for the methods Systems Thinking, System Dynamics and agent-based modelling on a climate adaptation topic and compared the different options for analysing the complex impact of policy instruments. The developed concept presents the findings from research, test model development and experts on the application of system models in policy advice, including the presentation of a common modelling process. The developed factsheet serves the transfer of knowledge to strengthen the application of system modelling in policy advice practice in order to better consider the complex and social impacts of policy instruments in the future.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis .....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	13
Summary .....	17
1 Einführung in die Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten.....	21
2 Systemmodellierungsmethoden zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten ....	27
2.1 Qualitative Systemmodellierungsmethoden .....	28
2.2 Semi-quantitative Systemmodellierungen .....	29
2.3 Quantitative Systemmodellierungen .....	30
2.4 Hybride Systemmodellierungen.....	31
3 Konzept zum Einsatz von Systemmodellen zur Bewertung von Politikinstrumenten .....	32
3.1 Der Modellierungsprozess .....	32
3.1.1 Schärfen der Problemstellung und des Modellierungszieles.....	33
3.1.2 Auswahl der passfähigsten Systemmodellierungsmethode(n) .....	34
3.1.3 Erstellung der Systemmodellstrukturen .....	35
3.1.4 Parametrisierung quantitativer Systemmodelle.....	36
3.1.5 Validierung & Testen der Systemmodelle .....	37
3.1.6 Analyse der Wirksamkeit des Politikinstrumentes/Policy-Mixes durch Modellszenarien .....	38
3.1.7 Präsentation der Modellerkenntnisse an politische Entscheidungsträger*innen.....	38
3.1.8 Generelle Anmerkungen zum Modellierungsprozess.....	39
3.2 Notwendige Ressourcen für die Erstellung von Systemmodellen .....	40
3.2.1 Zeitlicher Aufwand.....	40
3.2.2 Expertise und personeller Aufwand.....	42
3.2.3 Daten- und Informationsbeschaffung.....	44
3.3 Mehrwert und Limitierungen.....	45
3.4 Mögliche Anwendungsfelder für die Systemmodellierungsmethoden in der Politikberatung.....	47
3.5 Anwendbarkeit der Systemmodellierungsmethoden im Kontext des Umweltbundesamts	52
4 Exemplarische Anwendung von Systemmodellierungsmethoden.....	54
4.1 Ziel des Modellierungstests .....	54
4.2 Auswahl der Systemmodellierungsmethoden für die Testmodelle .....	54

4.3	Auswahl des zu modellierenden Themenfeldes und Politikinstrumente .....	56
4.4	Modellierungsprozess der Testmodelle.....	58
4.5	Vergleich der Systemmodellierungsansätze an Testmodellen .....	59
4.5.1	Qualitatives, aggregiertes Systemmodell: Systems Thinking (Causal Loop Diagram) Modell .....	60
4.5.2	Quantitatives, aggregiertes Systemmodell: System Dynamics Modell .....	67
4.5.3	Quantitatives, detailliertes Systemmodellkonzept: Agent-Based Modell.....	75
4.6	Benötigte Daten für die Testmodelle.....	78
4.7	Erkenntnisse aus den Praxisworkshops .....	80
4.7.1	Erster Workshop „Modellierung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten am Beispiel der Umsetzungsdynamik des Regenwasserrückhaltes .....	81
4.7.2	Zweiter Workshop „Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten – Umsetzung in der Praxis“ .....	82
4.8	Hypothetische Anwendbarkeit der Testmodelle in der Politikberatung .....	83
5	Factsheet zur Einführung in Systemmodellierungen für die Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten.....	87
	Quellenverzeichnis .....	90

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiele für Bereiche der Politikmodellierung .....	23
Abbildung 2:	Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten.....	25
Abbildung 3:	Klassifizierung von Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten nach deren Komplexität .....	26
Abbildung 4:	Überblick über die qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Systemmodellierungsmethoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten .....	27
Abbildung 5:	Vereinfachtes Schema eines üblichen Prozesses zur Erstellung von Systemmodellen für die Bewertung von Politikinstrumenten innerhalb der Politikberatung .....	33
Abbildung 6:	Typologie der in der Politikmodellierung verwendeten Methoden mit Beispiel-Workflows nach Voinov (2018) .....	40
Abbildung 7:	Causal Loop Diagram des a) Entscheidungsprozesses des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen (AM) und sich daraus ergebend b) der Auswirkung der Anpassungskapazität des Quartiers auf die Mietenden (HH für Haushalte) und deren Auswirkung auf das Immobilienunternehmen (mit ausgegrautem Teil aus a). B: ausgleichende Rückkopplungsschleifen („Balancing Feedback Loops“), R: verstärkende Rückkopplungsschleifen („Reinforcing Feedback Loops“), Doppelstrich auf einer Verbindung stellt eine starke Verzögerung („delay“) im System dar. ....	63
Abbildung 8:	Causal Diagram mit Einbindung des informatorischen Politikinstrumentes. Grüne Verbindungen stellen die Einbindung des informatorischen Politikinstrumentes dar. Angenommen wird hier eine Beratung des Immobilienunternehmens (Grundstruktur aus Abbildung 7).....	64
Abbildung 9:	Causal Loop Diagram mit Einbindung des rechtlichen Politikinstrumentes.....	66
Abbildung 10:	Causal Loop Diagram mit Einbindung des ökonomischen Politikinstrumentes .....	67
Abbildung 11:	a) Stock-Flow-Diagramm des beispielhaften SDM zur Umsetzung von Schwammstadt-Anpassungsmaßnahmen (AM) im Quartier ohne Politikinstrumente, b) Dynamik des Referenzmodus aus dem SDM ohne Dürre und ohne Politikinstrumente, c) Dynamik der Variante mit moderat auftretenden Dürreereignissen ab dem Jahr 2020 und ohne Politikinstrumente. Werte der Motivation, des Grünanteils und der Attraktivität reichen im Modell von 0 (Minimum) bis 1 (Maximum).....	71
Abbildung 12:	Stock-Flow-Diagramm des beispielhaften SDM zu Umsetzungen von Schwammstadt-Anpassungsmaßnahmen (AM) im Quartier mit informatorischem, ökonomischem und rechtlichem Politikinstrument auf Basis des qualitativen CLD Modells in Abbildung 11a.....	73
Abbildung 13:	Dynamik des SDM mit moderat auftretender Dürre und Einbindung a) eines informatorischen, b) eines ökonomischen, eines rechtlichen Politikinstrumentes und d) eines Policy-Mixes, implementiert ab dem Jahr 2030 (Vergleich mit Abbildung 11a und b ohne Politikinstrumente). Werte der Motivation, des Grünanteils und der Attraktivität reichen im Modell von 0 (Minimum) bis 1 (Maximum). ....	74

Abbildung 14: Generalisierte Übersicht des Agent-Based Modellkonzeptes, die die handelnden Akteure (Agent.IMMO entspricht dem Immobilienunternehmen, Agent.PB.EW entspricht den bewohnenden Mietenden), ihre Interaktionen, Motivationen, Handlungsoptionen sowie die Eigenschaften ihres Wohnumfeldes zeigt. EW: Einwohner, Q: Quartier, B: Betroffenheit, MFH: Mehrfamilienhaus, PB: Plattenbau, Immo: Immobilienunternehmen .....	75
Abbildung 15: SINUS Milieus.....	77
Abbildung 16: Visualisierung eines beispielhaften Spannungsverhältnisses zwischen den Bedürfnissen von Entscheidungsträger*innen und Modellierer*innen bezüglich der Systemmodellierungsmethoden .....	88
Abbildung 17: Entscheidungsbaum als Orientierungshilfe für die Methodenauswahl aus Sicht der Ressourcenabschätzung respektive des Forschungsziels.....	89

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einschätzung des Zeitaufwandes für qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten von gering (einige Tage bis wenige Wochen), mittel (einige Wochen bis Monate) bis hoch (einige Monate bis Jahre). .....	42
------------	--	----

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
<b>ABM</b>	Agent-Based Modelling / Agentenbasierte Modellierung
<b>AI</b>	Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)
<b>AM</b>	Anpassungsmaßnahme(n)
<b>APA</b>	Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
<b>AG</b>	Auftraggeber*innen
<b>BBSR</b>	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<b>BfN</b>	Bundesamt für Naturschutz
<b>CLD</b>	Causal Loop Diagram (oder „Kausaldiagramme“)
<b>DAS</b>	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
<b>EEA</b>	Europäische Umweltagentur / European Environment Agency
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>HLNUG</b>	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
<b>IÖR</b>	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
<b>KomPass</b>	Kompetenzzentrum für Klimafolgen und Anpassung (UBA)
<b>MT</b>	Modellierungsteam
<b>ODD</b>	Overview Design Concepts and Details
<b>RWR</b>	Regenwasserrückhalt
<b>SD / SDM</b>	System Dynamics (Modell)
<b>ST / STM</b>	Systems Thinking (Modell)
<b>SFD</b>	Stock-Flow-Diagramm
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt

## Zusammenfassung

Prozesse wie der Klimawandel und dessen Bewältigung sind hochkomplex. Viele verschiedene Faktoren wirken direkt, indirekt oder mehrdimensional aufeinander ein und sind miteinander verwoben. Solche Prozesse sind gekennzeichnet durch nicht-lineare Systemdynamiken mit Wechselwirkungen und Nebeneffekten, die sich nicht ohne Weiteres erkennen oder vorhersagen lassen. Entscheidungsträger\*innen in der Politik müssen auf diese Unwägbarkeiten reagieren und Entscheidungen treffen. Doch ist das bisherige Wissen ausreichend, um gute Entscheidungen zu treffen? Welche politischen Instrumente und Maßnahmen von heute können die Herausforderungen von morgen in effektiver Weise adressieren? Wen betreffen diese auf welche Art und Weise und wen nicht? Wie wirken diese auf die Adressaten, ist die Akzeptanz vorhanden oder kommt es gar zur Verweigerungshaltung?

Verschiedene Methoden zur Bewertung und Empfehlung von Politikinstrumenten werden bereits genutzt. Die meisten basieren jedoch hauptsächlich entweder auf Subjektivität, wie z. B. Expert\*inneneinschätzungen, oder auf monokausalen, stark vereinfachten Ursache-Wirkungs-Prinzipien. Komplexe Themenfelder zeichnen sich jedoch dadurch aus, dass sie inhärent interdisziplinär und stark verzahnt sind. Zudem weisen sie zahlreiche schwer zu erfassende, teils nichtintuitive und nichtlineare Wechselwirkungen auf, die mit linearen Ansätzen kaum erfasst werden können. In der Folge besteht die Gefahr, dass Politikinstrumente entwickelt werden, die ihre Ziele verfehlen. Daher werden Bewertungsmethoden benötigt, die sich explizit auf die Erfassung der Komplexität von Systemen konzentrieren und analysieren, wie Politikinstrumente das Systemverhalten verändern. Qualitative und quantitative Systemmodellierungsansätze können die komplexen und sozialen Wirkungen von Politikinstrumenten auf verschiedene Art und Weise abbilden, haben dabei aber auch kontextbedingt ihre Grenzen. Auf der Basis dieser Systemmodellierungen lassen sich die Dynamiken im System nachvollziehen, Szenarien entwickeln und Schlussfolgerungen für die Optimierung möglicher Politikinstrumente und -maßnahmen ableiten. Ihr großer Vorteil ist, dass sie auch gesellschaftliche Auswirkungen modellieren können. Damit sind Systemmodellierungen geeignet, die komplexen und gesellschaftlichen Auswirkungen von politischen Entscheidungen vor deren Umsetzung abzuschätzen.

Aus diesen Gründen war das zentrale Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie die Untersuchung und Prüfung von Systemmodellierungsansätzen, die zur Bewertung von Politikinstrumenten *vor* ihrer praktischen Einführung geeignet sein können. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die umfangreichen Recherchen zu Systemmodellierungsmethoden zusammen und zieht Schlussfolgerungen für deren praktische Anwendung in der Politikberatung. Die Modellierungsmethoden weisen Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede auf, die in diesem Bericht im Detail diskutiert werden.

Auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche wurden in einem ersten Schritt verschiedene Systemmodellierungsansätze recherchiert, mit denen die komplexen und sozialen Auswirkungen von Politikinstrumenten abgebildet werden können. Es wurden auch praktische Beispiele für deren Anwendung ermittelt. Die Methoden wurden zudem hinsichtlich ihrer Eignung für den spezifischen Bereich der Anpassung an den Klimawandel untersucht. Der entsprechende Teilbericht „Qualitative und quantitative Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten“ wurde in der UBA-Schriftenreihe Climate Change 41/2023 veröffentlicht (Schünemann et al., 2023).

Der vorliegende Abschlussbericht fasst folgende Inhalte zusammen:

- Kurzdarstellung von identifizierten *Systemmodellierungsmethoden*

- ▶ Die Erarbeitung eines *Konzeptes für die Erstellung sowie Anwendung von Systemmodellen* (inklusive einer Beschreibung der dafür notwendigen Ressourcen sowie einer Einschätzung ihrer Vor- und Nachteile und ihrer Eignung in der Politikberatung).
- ▶ *Exemplarische Anwendungen von drei Systemmodellierungsmethoden* (Systems Thinking, System Dynamics, agentenbasierter Modellierung) an einem Modellierungsbeispiel. Dieses betraf die Abbildung der Umsetzungsdynamik von Schwammstadtmaßnahmen in einem städtischen Wohnquartier und die Wirksamkeit von drei Politikinstrumenten.
- ▶ Die *Erstellung eines Factsheets*, das eine zusammenfassende und grafisch visualisierte Einführung in das Thema der Systemmodellierungen für Praxisakteure im Feld der Politikberatung darstellt.

In Kapitel 2 dieses Abschlussberichtes werden die im Teilbericht (Schünemann et al., 2023) vorgestellten *Systemmodellierungsmethoden* erneut aufgegriffen und ihre *Charakteristika knapp skizziert*. Die Methoden unterscheiden sich hauptsächlich darin, wie die Daten erhoben und verarbeitet werden, woraus sich verschiedene Klassifizierungen der Modellierungsmethoden ergeben. Die Methoden werden nach ihrem qualitativen oder quantitativen Charakter sowie ihrer aggregierten oder detaillierten Betrachtungsweise eingeordnet. Qualitative Methoden beziehen sich auf Systemstrukturen und brauchen nicht quantifiziert zu werden. Quantitative Methoden ermöglichen tiefere Einblicke in die Wirkung des Politikinstrumentes auf das Systemverhalten, in dem sie dieses in Simulationen zeitlich auflösen können.

Das dritte Kapitel stellt ein innerhalb der Machbarkeitsstudie *entwickeltes Konzept für den Einsatz von Systemmodellierungen in der Politikberatung* vor. Eine standardisierte Vorgehensweise für Systemmodellierungen generell ist nicht möglich. Dennoch haben die Literaturrecherche, die Einbindung von Expert\*innen aus der Praxis und die eigenen Erfahrungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie nachweisen können, dass ein idealtypischer Ablauf (hier Konzept) häufig zu finden ist. Das entwickelte Konzept ist für alle Methoden der Systemmodellierungen anwendbar. Einzelne Schritte können mehr oder weniger Ressourcen (Zeitaufwand, Expertise, Finanzen) benötigen, die Reihenfolge der Abläufe ändert sich jedoch nicht. Neben dem Umfang der einzelnen Prozessschritte unterscheiden sich auch die Ressourcen, die für die Modellierung benötigt werden. Während qualitative Modelle nur qualitative Informationen und Daten benötigen, stellen quantitative Modelle höhere Anforderungen an die notwendige Datenbasis. Dabei wird unterschieden, wie einfach die quantitativen Daten für die Systemvariablen im Modell zu erheben sind. Einfach zu erhebende Variablen können durch schnelle Recherchen mit geringem Aufwand ermittelt werden, aufwendig zu erhebende Daten nur durch intensive Recherche und sehr aufwändig zu erhebenden Daten, die vor allem soziale Variablen umfassen, meist nur mit zusätzlichen Methoden der empirischen Sozialforschung. In allen Fällen ist der Ressourcenaufwand für quantitative Systemmodellierungen höher als für qualitative.

In der Diskussion zu Möglichkeiten und Grenzen von Systemmodellierungsmethoden zur Abschätzung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten zeichnet sich ab, dass Systemmodelle die klassische Politikberatung vor allem bei hochkomplexen Fragestellungen unterstützen können. Sie können aufzeigen, wo Politikinstrumente im System unbeabsichtigte Nebeneffekte, unbekannte Wechselwirkungen oder Nichtlinearitäten hervorrufen. Zudem ermöglichen v. a. qualitative Systemmodellierungen eine partizipative Erstellung, so dass Entscheidungsträger\*innen, Stakeholdern, Expert\*innen oder auch Bürger\*innen ihr Systemwissen in das Modell einbringen können. Die Wirkung von Politikinstrumenten kann in Modellen in Szenarien getestet werden, sodass mögliche Unzulänglichkeiten in der Gestaltung der Politikinstrumente erkannt und optimiert werden können, bevor sie sich in der Realität

auswirken. Damit leisten die untersuchten Methoden einen wesentlichen Beitrag zur Wirksamkeitsbewertung von Politikinstrumenten.

Die Anwendungsfelder für Modellierungsmethoden der Politikberatung sind äußerst vielfältig. Angesichts der Unterschiede in den methodischen Ansätzen ist es jedoch von wesentlicher Bedeutung, die für die jeweilige Situation geeignete(n) Methode(n) sorgfältig auszuwählen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass Modellierer\*innen über ausreichend Expertise verfügen, um die geeignetsten Modellierungsmethode zu wählen. Qualitative Systemmodelle eignen sich besonders für systemische oder explorative Fragestellungen, sind gut visualisierbar und benötigen weniger Ressourcen. Auf der anderen Seite stellen quantitative Systemmodellierungsmethoden eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung, um entweder aggregierte oder detaillierte zeitliche Informationen zu liefern, die auch Verhaltensänderungen von Akteuren im Laufe der Zeit aufzeigen können. Sie sind jedoch deutlich ressourcenintensiver und benötigen einen längeren Zeitraum zur Erstellung. Sie eignen sich daher eher für eingehende, langfristige Analysen von tiefgreifenden Änderungsprozessen. Trotz ihrer Vorteile werden Systemmodelle bisher kaum in der praktischen Politikberatung eingesetzt. In diesem Bericht befinden sich auch Empfehlungen, die den Wissenstransfer hinsichtlich dieser Methoden erleichtern sollen. Auf der Grundlage von Forschung und Expert\*innenwissen haben wir ein Konzept entwickelt, welches dabei helfen kann, die Anwendung von Systemmodellierungsmethoden in der Politikberatung zu erhöhen. Es ist dabei wichtig zu beachten, dass Politikberatung und Politik selbst sehr komplexe Bereiche sind. Daher ist es entscheidend, auf welcher Ebene man ansetzt, um die Methoden effektiv anzuwenden und praktische Lösungen zu finden.

Kapitel 4 thematisiert die *exemplarische Anwendung von drei geeigneten Systemmodellierungsmethoden* anhand eines konkreten Beispiels. Als Methoden wurden das qualitative Causal Loop Diagram (aus der Toolbox des System Thinking) und die beiden quantitativen Modellierungsansätze System Dynamics und Agent-based Modelling ausgewählt. Ziel der Testmodelle ist die Veranschaulichung der Systemmodellierungsmethoden an einem konkreten Beispiel. Dadurch, dass alle Methoden mit dem gleichen Beispiel angewandt wurden, ist eine direkte Vergleichbarkeit der Modellierungsansätze möglich. Als Thema für diese exemplarische Anwendung wurde die Umsetzungsförderung des "Schwammstadt"-Konzeptes in einem innerstädtischen Wohnquartier durch Politikinstrumente ausgewählt. Innerhalb dieses Themenfeldes wurde beispielhaft die Lenkungswirkung verschiedener Politikinstrumente in vereinfachter Art und Weise abgebildet. Das Themenbeispiel „Schwammstadt“ beinhaltet die präzise Leitfrage, welche Politikinstrumente (bzw. Policy-Mixes) in welcher Form die Anpassungsfähigkeit eines Stadtquartiers an Starkregenereignisse und Trockenperioden verbessern können. Jedes Systemmodell wies Unterschiede, aber auch Gemeinsamkeiten in der Herangehensweise auf. Mit Hilfe der qualitativen Causal Loop Diagram konnte beschreibend aufgezeigt werden, welche Systemzusammenhänge die Wirksamkeit von Politikinstrumenten verstärken oder hemmen. Das quantitative System Dynamics Modell baut auf dem zuvor erstellten Causal Loop Diagram auf, indem es dieselbe Systemstruktur verwendet. Die Wirkungsanalyse identifizierte somit ähnliche verstärkende und ausgleichende Rückkopplungsschleifen wie das Causal Loop Diagram. Allerdings wurde das Modell quantifiziert, was eine wesentlich tiefere und vor allem zeitaufgelöste Analyse der zukünftigen Auswirkung von Politikinstrumenten ermöglichte. Das ebenfalls quantitative agentenbasierte Testmodell zeigte wiederum einen anderen Fokus, indem es sich auf die individuellen Handlungen, Eigenschaften und Verhaltensweisen der im Modell abgebildeten heterogenen Akteure konzentrierte. Das agentenbasierte Modell ist jedoch nur ein Konzeptmodell, dessen Struktur entwickelt wurde, jedoch die Quantifizierung der Entscheidungsregeln etc. fehlt. Das Modell kann, wenn quantifiziert, sogar konkrete Zeitpunkte von Verhaltensveränderungen einzelner Bewohner\*innen abbilden. Die Modellvergleiche verdeutlichen noch einmal die

unterschiedlichen Anwendungsfelder der Systemmodellierungsansätze, je nachdem, welcher Aspekt des Politikinstrumentes bewertet werden soll.

Im Kapitel 5 wird die Entwicklung des Factsheets als ein wesentliches Produkt der Machbarkeitsstudie beschrieben, das in englischer und deutscher Sprache veröffentlicht wird. Es hat das Ziel, Interessierte aus Politik und Beratung kurz und übersichtlich in das Thema der Systemmodellierungen einzuführen und die wichtigsten Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie zusammenzufassen. Dabei hat es den Anspruch, in möglichst kurzer, visuell ansprechender Form und leicht verständlicher Sprache einen Überblick über Methoden, Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungspotenziale zu geben. Zentrale Elemente sind dabei zwei für das Factsheet entwickelte Grafiken. Die erste veranschaulicht die Konfliktsituation zwischen Entscheidungsträger\*in und Modellierer\*in mit dem Ziel, die bisher geringe Anwendung von Systemmodellen in der Politikberatung zu erklären. Die zweite Grafik stellt einen Entscheidungsbaum dar, um die passfähigste Systemmodellierungsmethode für die Evaluierung von Politikinstrumenten auszuwählen. Das Factsheet dient dem Wissenstransfer zur Stärkung der Anwendung von Systemmodellierungen in der Politikberatungspraxis, um zukünftig die komplexe und soziale Wirkung von Politikinstrumenten besser zu berücksichtigen.

## Summary

Processes such as climate change and its management are highly complex. Many different factors have a direct, indirect or multidimensional impact on each other and are interwoven. Such processes are characterised by non-linear system dynamics with interactions and side effects that cannot be easily identified or predicted. Decision-makers in politics have to react to these imponderables and make decisions. But is the knowledge we have so far sufficient to make good decisions? Which of today's political instruments and measures can effectively address the challenges of tomorrow? Who do they affect and how, and who do they not affect? What effect do they have on the addressees, is there acceptance or is there even an attitude of refusal?

Various methods for evaluating and recommending policies are already in use. However, most of them are mainly based either on subjectivity, such as expert judgements, or on monocausal, highly simplified cause-and-effect principles. However, complex subject areas are characterised by the fact that they are inherently interdisciplinary and highly interlinked. They are also characterised by numerous difficult to grasp, sometimes non-intuitive and non-linear interactions that can hardly be captured using linear approaches. As a result, there is a risk that policies will be developed that fail to achieve their objectives. Therefore, evaluation methods are needed that explicitly focus on capturing the complexity of systems and analyse how policies change system behaviour. Qualitative and quantitative system modelling approaches can depict the complex and social effects of policies in various ways, but also have their limitations depending on the context. On the basis of these system modelling approaches, the dynamics in the system can be understood, scenarios can be developed and conclusions for the optimisation of possible policies and measures can be derived. Their great advantage is that they can also model social impacts. System modelling is therefore suitable for estimating the complex and social effects of political decisions before they are implemented.

For these reasons, the central aim of this feasibility study was to investigate and test system modelling approaches that may be suitable for evaluating policies prior to their practical introduction. This final report summarises the extensive research on system modelling methods and draws conclusions for their practical application in policy advice. The modelling methods have similarities, but also differences, which are discussed in detail in this report.

Based on a comprehensive literature review, the first step was to research various system modelling approaches that can be used to map the complex and social effects of policies. Practical examples of their application were also identified. The methods were also analysed with regard to their suitability for the specific area of adaptation to climate change. The corresponding sub-report "Qualitative and quantitative modelling of the effectiveness of policies" was published in the UBA publication series Climate Change 41/2023 (Schünemann et al., 2023).

This final report summarises the following contents:

- ▶ Brief description of identified system modelling methods
- ▶ The development of a concept for the creation and application of system models (including a description of the resources required for this as well as an assessment of their advantages and disadvantages and their suitability for policy advice).

- ▶ Exemplary applications of three system modelling methods (Systems Thinking, System Dynamics, agent-based modelling) using a modelling example. This concerned the modelling of the implementation dynamics of Sponge City measures in an urban residential area and the effectiveness of three policies.
- ▶ The creation of a factsheet that provides a summarised and graphically visualised introduction to the topic of system modelling for practitioners in the field of policy advice.

Chapter 2 of this final report revisits the system modelling methods reviewed in the partial report (Schünemann et al., 2023) and briefly outlines their characteristics. The methods differ mainly in how the data is collected and processed, which results in different classifications of the modelling methods. The methods are categorised according to their qualitative or quantitative nature and their aggregated or detailed approach. Qualitative methods relate to system structures and do not need to be quantified. Quantitative methods provide deeper insights into the effect of the policy on system behaviour by being able to resolve this over time in simulations.

The third chapter presents a concept developed within the feasibility study for the use of system modelling in policy consulting. A standardised procedure for system modelling in general is not possible. Nevertheless, the literature research, the involvement of experts from the field and our own experiences within the framework of the feasibility study have shown that an ideal-typical procedure (concept in this case) can often be found. The concept developed can be applied to all methods of system modelling. Individual steps may require more or fewer resources (time, expertise, finances), but the sequence of processes does not change. In addition to the scope of the individual process steps, the resources required for modelling also differ. While qualitative models only require qualitative information and data, quantitative models place higher demands on the necessary database. A distinction is made between how easy it is to collect quantitative data for the system variables in the model. Variables that are easy to collect can be determined through quick research with little effort, data that is complex to collect can only be determined through intensive research and data that is very complex to collect, which primarily includes social variables, usually only with additional methods of empirical social research. In all cases, the resources required for quantitative system modelling are higher than for qualitative modelling.

In the discussion on the possibilities and limitations of system modelling methods for estimating the steering effect of policies, it is becoming apparent that system models can support traditional policy advice, particularly in the case of highly complex issues. They can show where policies in the system cause unintended side effects, unknown interactions or non-linearities. In addition, qualitative system modelling in particular enables participatory creation, so that decision-makers, stakeholders, experts and citizens can contribute their system knowledge to the model. The impact of policies can be tested in models in scenarios so that potential shortcomings in the design of policies can be identified and optimised before they have an impact in reality. The methods analysed thus make a significant contribution to the effectiveness assessment of policies.

The fields of application for modelling methods in policy consulting are extremely diverse. However, given the differences in methodological approaches, it is essential to carefully select the appropriate method(s) for each situation. For this reason, it is necessary for modellers to have sufficient expertise to choose the most appropriate modelling method. Qualitative system

models are particularly suitable for systemic or explorative questions, are easy to visualise and require fewer resources. On the other hand, quantitative system modelling methods provide a variety of options for providing either aggregated or detailed temporal information that can also show changes in the behaviour of actors over time. However, they are significantly more resource-intensive and require a longer period of time to produce. They are therefore more suitable for in-depth, long-term analyses of far-reaching change processes. Despite their advantages, system models have so far hardly been used in practical policy advice. This report also contains recommendations to facilitate the transfer of knowledge regarding these methods. Based on research and expert knowledge, we have developed a concept that can help to increase the use of systems modelling methods in policy advice. It is important to note that policy advice and policy itself are very complex areas. Therefore, it is crucial at which level to start in order to apply the methods effectively and find practical solutions.

Chapter 4 focuses on the exemplary application of three suitable system modelling methods using a specific example. The methods selected were the qualitative Causal Loop Diagram (from the Systems Thinking toolbox) and the two quantitative modelling approaches System Dynamics and Agent-based Modelling. The aim of the test models is to illustrate the system modelling methods using a specific example. The fact that all methods were applied to the same example makes it possible to directly compare the modelling approaches. The topic selected for this exemplary application was the promotion of the implementation of the "sponge city" concept in an inner-city residential neighbourhood through policies. Within this topic area, the steering effect of various policies was illustrated in a simplified manner. The "sponge city" thematic example included the precise key question of which policies (or policy mixes) can improve the adaptability of an urban neighbourhood to heavy rainfall events and dry periods and in what form. Each system model showed differences, but also similarities in the approach. With the help of the qualitative Causal Loop Diagram, it was possible to show descriptively which system interrelationships reinforce or inhibit the effectiveness of policies. The quantitative System Dynamics model builds on the previously created causal loop diagram by using the same system structure. The impact analysis thus identified similar reinforcing and equalising feedback loops as the causal loop diagram. However, the model was quantified, which enabled a much deeper and, above all, time-resolved analysis of the future impact of policies. The agent-based test model, which was also quantitative, had a different focus in that it concentrated on the individual actions, characteristics and behaviour of the heterogeneous actors depicted in the model. However, the agent-based model is only a conceptual model, the structure of which has been developed, but the quantification of the decision rules etc. is missing. If quantified, the model can even depict specific points in time when the behaviour of individual residents changes. The model comparisons once again illustrate the different fields of application of the system modelling approaches, depending on which aspect of the policy is to be evaluated.

Chapter 5 describes the development of the factsheet as a key product of the feasibility study, which will be published in English and German. It aims to provide a brief and clear introduction to the topic of system modelling for interested parties from politics and consulting and to summarise the most important findings of the feasibility study. The aim is to provide an overview of methods, possibilities, limitations and potential applications in the shortest possible, visually appealing form and in easily understandable language. The central elements are two graphics developed for the factsheet. The first illustrates the conflict situation between decision-makers and modellers with the aim of explaining the limited use of system models in

policy advice to date. The second graphic represents a decision tree for selecting the most suitable system modelling method for the evaluation of policies. The factsheet serves the transfer of knowledge to strengthen the application of systems modelling in policy consulting practice in order to better consider the complex and social impact of policies in the future.

# 1 Einführung in die Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten

Computergestützte qualitative und quantitative Modellierungen und Simulationen im Feld „**Public Policy Modeling**“ können die politische Entscheidungsfindung entscheidend unterstützen. Diese Methoden erlauben es, die vielfältigen Wirkungen von Politikinstrumenten in komplexen Systemen virtuell zu modellieren. Auf diese Weise können politische Anpassungsmaßnahmen *vor* (Ex-ante) ihrer tatsächlichen Einführung eingeschätzt und gegebenenfalls angepasst werden. Um die Komplexität der Wirkung von Politikinstrumenten möglichst ganzheitlich zu erfassen, sind interdisziplinäre Herangehensweisen erforderlich. Das bedeutet, die Modelle integrieren natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftliche Methoden (Van Loon et al., 2016). So können sie Dynamiken, unerwartete Nebeneffekte oder Kritikalität disziplin- und sektorenübergreifend aufzeigen.

Die praktische Politikberatung nutzt gegenwärtig bereits eine Reihe von Techniken zur ex-ante-Bewertung von Politikinstrumenten. Dazu zählen beispielsweise Experteneinschätzungen oder die Multikriterienanalyse (MCDA). Diese Ansätze basieren jedoch meist auf stark vereinfachten Ursache-Wirkungs-Prinzipien. Komplexe Themenfelder zeichnen sich aber gerade dadurch aus, dass sie wegen nicht-linearen und dynamisch-adaptiven Rückkopplungen nicht intuitiv erfasst werden können. Dies erhöht die Risiken, politische Instrumente zu entwickeln, die ihre Ziele verfehlen könnten. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle argumentiert, dass es Bewertungsmethoden braucht, die der Komplexität in geeigneter Weise gerecht werden können. Die qualitativen und quantitativen Methoden der Systemmodellierung zielen explizit darauf ab, die Komplexität von Systemen zu berücksichtigen. Aus Systemmodellen können Schlussfolgerungen gezogen werden, um mögliche politische Maßnahmen besser zu kontextualisieren und zu optimieren. Um ihre Stärken aber auch Limitierungen zu erforschen, führte das Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung die Machbarkeitsstudie „*Modellierung von Anpassungsmaßnahmen: Akteure, Entscheidungen und Wirksamkeit. Qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten*“ im Auftrag des Umweltbundesamtes durch. Der Zweck war die Recherche von passfähigen Systemmodellierungsansätzen, welche die Lenkungswirkung zukünftiger Politikinstrumente (policy) speziell zur Klimaanpassung analysieren und bewerten.

Der Fokus lag dabei auf zwei Modellierungszielen:

- ▶ Wie lassen sich *komplexe, sektorenübergreifende, dynamische Wirkungen* von Politikinstrumenten modellieren?
- ▶ Wie kann das *Verhalten und Entscheidungen* der von Politikinstrumenten betroffenen Akteure (z. B. Akzeptanz, Ablehnung, Mund-zu-Mund-Propaganda) modelliert werden?

Beide Ziele wurden zunächst separat und dann in Kombination untersucht. So lag der Fokus nicht nur auf Methoden, die prüfen können, ob Politikinstrumente physikalisch wirksam sind, sondern auch ob und unter welchen Bedingungen sich die betroffenen Akteure letztendlich dazu entscheiden, die Maßnahmen wirklich umzusetzen. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass der deutschsprachige Begriff „Politikinstrument“ im Sinne der englischsprachigen „policy“ verwendet wird. In der politikwissenschaftlichen Forschung wird „Politik“ meist differenzierter und dreidimensional verstanden: Polity, Politics und Policy. *Polity* bezieht sich dabei auf Institutionen und Verfassungen, *Politics* auf die politischen (Verhandlungs-)Prozesse und *Policy* auf konkrete politische Inhalte. Die Dimension Policy beschreibt entsprechend die politischen Programme und Maßnahmen, die das Ergebnis des politischen Willensbildungsprozesses in

bestimmten Politikfeldern (z. B. Sozialpolitik, Wettbewerbspolitik, etc.) sind und die operativ umgesetzt werden (Blum & Schubert, 2011). Um die Wirkung zu erhöhen, werden *policies* oder Politikinstrumente oft kombiniert (Policy-Mix) (Blum & Schubert, 2011). In dieser Arbeit werden daher die singulären Politikinstrumente, aber auch ihr Zusammenwirken untersucht.

Die Machbarkeitsstudie setzte sich aus mehreren Arbeitspaketen zusammen. Im ersten Schritt wurden potenzielle Systemmodellierungs- und Simulationsansätze detailliert recherchiert und Beispiele ihrer praktischen Anwendungen vorgestellt. Schließlich wurden sie hinsichtlich ihrer Eignung für den Bereich der Klimawandelanpassungen beurteilt. Der entsprechende Bericht „*Qualitative und quantitative Modellierungen der Wirksamkeit von Politikinstrumenten. Möglichkeiten und Grenzen der Übertragbarkeit auf das Feld der Anpassung an den Klimawandel*“ wurde in der Reihe Climate Change 41/2023 des UBA publiziert (Schünemann et al., 2023). Der vorliegende Bericht ist das Abschlussdokument der gesamten Studie und fasst die restlichen Arbeitspakete zusammen, zu denen eine Konzeptualisierung, eine exemplarische Anwendung von Modellierungsmethoden und eine Untersuchung des Mehrwerts und der Limitierungen in der Politikberatung gehören.

Um den Forschungsfragen nachzugehen, war es notwendig zu verstehen, wie die verschiedenen Systemmodellierungsansätze funktionieren, was diese abbilden und wie sie genutzt werden können. Die Modellierungsbedingungen werden an dieser Stelle kurz erläutert.

### **Was sind komplexe Systeme?**

Unter einem *einfachen* System (lat. *systema*) wird zunächst ein Verbund von einzelnen Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften verstanden, die zueinander in Beziehung stehen und als geordnetes Ganzes betrachtet werden. Ein *komplexes* System besteht dagegen aus einer Vielzahl an Komponenten, deren Beziehungen nicht eindeutig sind. Stattdessen zeigen sie ein nicht-lineares dynamisches Verhalten und starke Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten. Außerdem bilden sich, basierend auf Offenheit, Pfadabhängigkeit oder Selbstregulation, neue Systemkomponenten heraus (Emergenz). Als Beispiele können sozio-ökonomische, sozio-technische oder techno-sozio-ökologische Systeme genannt werden. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesellschaft und Natur stellen solche komplexen Systeme dar, aber auch die Wirkung von Politikinstrumenten auf Beteiligte und Gesellschaft, denn Menschen handeln nicht immer und nicht nur rational, was deren Abbildung in Modellen erschwert und die Komplexität erhöht. Die in der Studie analysierten Modellierungsansätze versuchen, diese komplexen Systeme auf ganz verschiedene Art und Detailtiefe abzubilden.

### **Was ist eine Modellierung?**

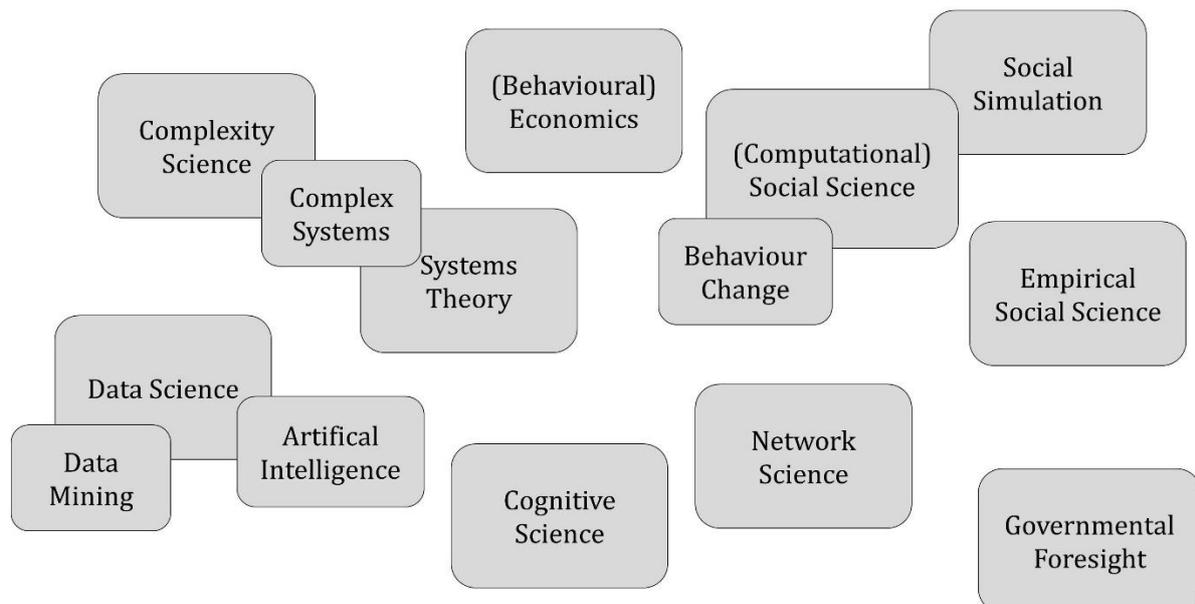
Allgemein gesprochen sind Modellierungen Versuche, die Wirklichkeit abzubilden. Da diese niemals exakt wiedergegeben werden kann, können Modelle immer nur einen Teilbereich der komplexen Realität darstellen (Ruiz Estrada & Yap, 2011). Wie groß dieser Ausschnitt ist, hängt davon ab, wie weit oder eng die Systemgrenzen gefasst werden (Sterman, 2000). Es gibt unterschiedliche methodische Herangehensweisen an die Modellerstellung. Qualitative Systemmodellierungen bilden eher die *Systemstruktur* ab. Quantitative Systemmodellierungen simulieren vor allem das *dynamische Systemverhalten*. Manche Modellierungsverfahren nutzen eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Methoden (Sterman, 2000). Die Wahl einer Modellierungsmethode muss gut überlegt sein und hängt immer davon ab, welches spezifische Problem untersucht werden soll.

### **Was ist Public Policy Modelling?**

Im sogenannten Feld des **Public Policy Modelling** kommen Modellierungsansätze verschiedenster Art in der Politikberatung zum Einsatz. Im Gegensatz zu Politikfeldanalysen, die

die Wirkung von Politikinstrumenten (policies) *nach* ihrer Umsetzung evaluieren (Ex-post Evaluierung), bieten Modellierungen eine Vorausschau auf mögliche *zukünftige* Wirkungen von politischen Entscheidungen (Ex-ante Einschätzung). Sie unterstützen die politischen Aushandlungsprozesse an mehreren Stellen oder Phasen, vor allem aber bei der Wissenssynthese, der Behandlung von Unsicherheit oder der Politikunterstützung (Bammer, 2013). Abbildung 1 zeigt, in welchen Bereichen das Public Policy Modelling zum Einsatz kommt. Insgesamt ermöglichen Politikmodellierungen das Experimentieren in der virtuellen Realität (Gilbert et al., 2018). *Vor* einer Einführung in der realen Welt können dementsprechend nicht-intendierte Auswirkungen oder Nebeneffekte identifiziert und Politikinstrumente angepasst werden. Gerade im komplexen Politikfeld der Klimawandelanpassungen, wo politische Entscheidungen eine Vielzahl von Faktoren betreffen, können die Wirkungen einer Policy oder die eines Policy-Mix vorab virtuell modelliert werden, um aus dem Erkenntnisgewinn Rückschlüsse für die reale Umsetzung zu ziehen.

**Abbildung 1: Beispiele für Bereiche der Politikmodellierung**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

### Was ist Social Simulation?

Ein integrales Element der Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten ist die Abbildung menschlichen Verhaltens. Das Feld der **Social Simulations** vereint quantitative Modellierungsansätze, die versuchen, die soziale Dimension auf verschiedenste Art und Weise abzubilden. Social Simulation muss in das Policy Modell als „Modul für menschliche Entscheidungsfindung“ (Schrieks et al., 2021) eingebunden werden, wenn die sozialen Auswirkungen von implementierten Politikinstrumenten untersucht werden sollen. Es dient insbesondere dazu zu überprüfen, wessen Verhalten unter welchen Bedingungen zu welchem Zweck verändert werden kann. Social Simulation gehört zur Klasse der computergestützten quantitativen Modellierungsansätze. Dabei wird unterschieden, ob soziale Systeme entweder auf Basis von aggregierten Daten, also dem gemittelten Verhalten von Gruppen, abgebildet werden oder ob individuelles Akteursverhalten (z. B. Entscheidungen) modelliert werden sollen (Schrieks et al., 2021). Für beide Ansätze gilt, dass die Simulation menschlichen Verhaltens anspruchsvoll ist, denn soziale Dynamiken verlaufen grundsätzlich nicht-linear und nicht-

rational, auch da Entscheidungen auf Grundlage von begrenzten Informationen getroffen werden. In Social Simulations können reale Gesellschaften als künstliche Gesellschaften (artificial societies) modelliert werden (Diallo et al., 2021; Giabbanelli et al., 2019). Um das reale Entscheidungsverhalten nachzuempfinden, stehen Ansätze aus verschiedenen Disziplinen zur Verfügung, die auch kombiniert werden können (Schünemann et al., 2023):

- ▶ *Ad-Hoc-Annahmen*: Die Entscheidungsfindung beschränkt sich auf einfache Annahmen, die von den Modellierer\*innen getroffen werden, ohne den zugrunde liegenden kognitiven Prozess abzubilden.
- ▶ *Ökonomische Verhaltenstheorien*: Die Entscheidungsfindung basiert z. B. auf der Theory of Expected Utility (Von Neumann & Morgenstern, 1947) (rationale egoistische Entscheidungen bei Vorliegen vollständiger Information) oder der Prospect Theory (Kahneman & Tversky, 1979) (beschreibt rationales Verhalten unter Risikobedingungen)
- ▶ *Psychologische Theorien*: Die Entscheidungsfindung geht von der Theory of Planned Behaviour (Ajzen, 1991) aus, die Verhaltenskontrolle durch subjektive Normen und Einstellungen beschreibt. Die Protection Motivation Theory (Rogers, 1983) beschreibt Entscheidungen, die davon abhängen, wie mit Risiko umgegangen wird.
- ▶ *KI/Maschinelles Lernen*: Die Entscheidungsfindung wird empirisch auf Basis von Big Data und/oder künstlichen neuronalen Netzwerken untersucht und modelliert, ohne die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse dafür zu berücksichtigen.

Social Simulation muss mit mehreren Herausforderungen umgehen. Erstens bestehen Schwierigkeiten bei der Quantifizierung subjektiver psychologischer Modellparameter. Zweitens sollte menschliches Verhalten aufgrund der großen Komplexität nicht zu vereinfacht dargestellt werden. Und drittens sollten die Entscheidungsregeln auch nicht zu kompliziert modelliert werden, denn das würde die Fehleranfälligkeit des Modells stark erhöhen (Schlüter et al., 2017). Um menschliches Verhalten zu parametrisieren, können mehrere Methoden der empirischen Sozialforschung angewandt werden.

- ▶ *Statistikgestützt*: Statistiken oder Verhaltensnachweise aus der Vergangenheit (z. B. Ereignisverläufe, Zusammenhänge zwischen politischen Maßnahmen und daraus resultierenden Ergebnissen) werden genutzt. In der Regel müssen individuelle und aggregierte Daten kombiniert werden, um allgemeine Trends widerzuspiegeln (Seligman, 2012).
- ▶ *Befragungen*: Repräsentative Gruppen, deren Verhalten abgebildet werden soll, werden befragt. Die Fragen sind so gestaltet, dass daraus die Einflussgrößen des Modells parametrisiert werden können.
- ▶ *Data Science*: Verhaltensdaten werden den sozialen Netzwerken oder anderen digitalen Diensten entnommen und parametrisiert.

Nach der Parametrisierung muss das Modell validiert und eine ausgiebige Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Auf diese Weise kann der Einfluss der Parameter auf die Modelldynamik getestet werden.

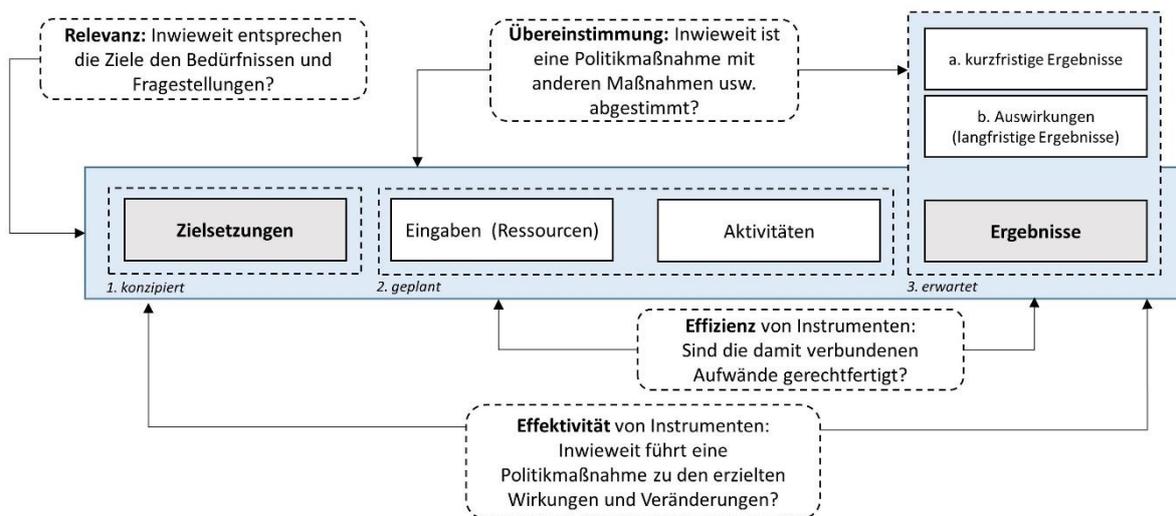
#### **Wie bewertet man die Wirksamkeit von Politikinstrumenten?**

Das Projekt konzentrierte sich auf die Wirksamkeitsbewertung von Politikinstrumenten. Die Wirksamkeit wird daran gemessen, ob die Maßnahme die beabsichtigten Ziele tatsächlich erreicht. Die Wirksamkeitsbewertung basiert dabei auf vier Hauptfaktoren:

1. Relevanz der Zielsetzung
2. Übereinstimmung der Maßnahmen
3. Effizienz
4. Effektivität

Abbildung 2 zeigt einen Überblick über den Prozess der Wirksamkeitsbewertung. Entscheidende Elemente der Abbildung 2 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 (ebd.). 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 politischer Maßnahmen kann sowohl individuell als auch ganzheitlich bewertet werden, wobei verschiedene Facetten, wie institutionelle Effektivität, Zielgruppenreaktionen, gesellschaftliche Relevanz und Nebenwirkungen, berücksichtigt werden. Bei der Auswahl einer Modellierungsmethode sollte die beabsichtigte Funktionalität des Modells im Vordergrund stehen. Zuerst sollten die Ziele und Anforderungen der politischen Maßnahmen definiert werden, bevor die passenden Modellierungsansätze gewählt werden. Dieser Ansatz gewährleistet, dass die Modellierung den spezifischen Anforderungen der politischen Beratung entspricht und zur Lösung konkreter Fragestellungen beiträgt.

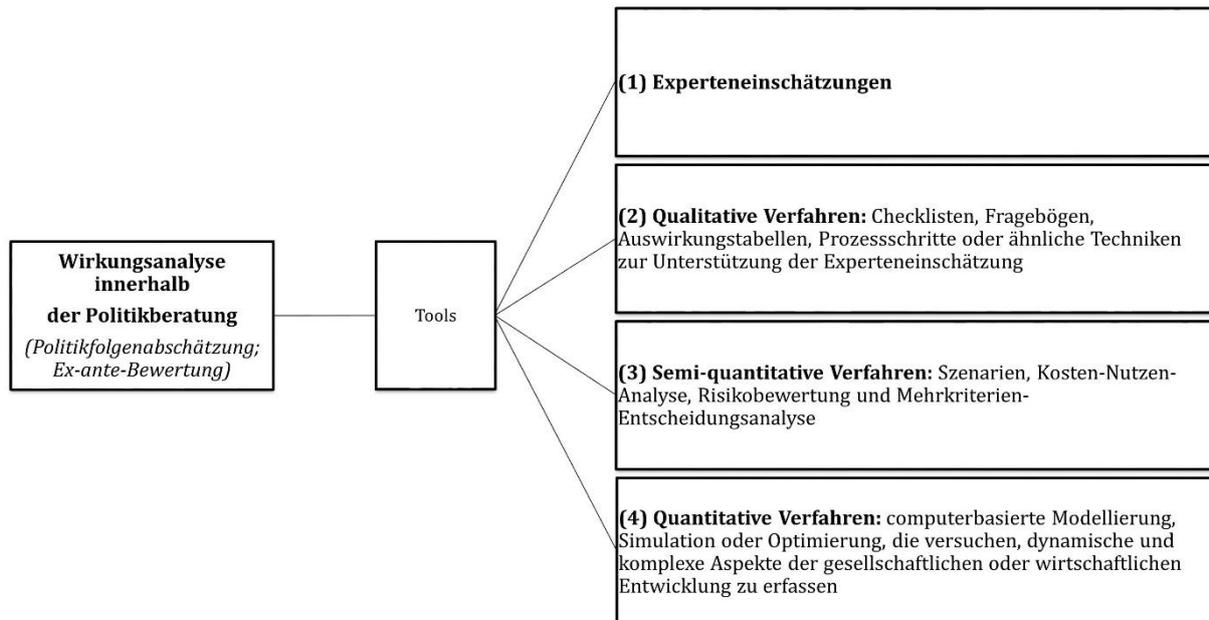
**Abbildung 2: Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten**



Quelle: Übersetzt und überarbeitet von European Environment Agency (2016).

Neben der Bewertung der Wirksamkeit gibt es auch verschiedene Methoden, mittels derer Wirkungen analysiert werden können. Abbildung 3 visualisiert den Komplexitätsgrad von möglichen Verfahren anhand eines Stufenprinzips (Nilsson et al., 2008).

**Abbildung 3: Klassifizierung von Verfahren der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten nach deren Komplexität**



Quelle: Überarbeitet von Nilsson (2008).

Demnach gibt es vier unterschiedlich anspruchsvolle Ansätze, um Wirkungen von Politikinstrumenten einzuschätzen. Die einfachste Option ist, Expert\*innen um ihre Meinungen zu bitten. Ein umfassenderer Ansatz besteht darin, zweitens, qualitative Modellierungen mit Einschätzungen von Expert\*innen zu kombinieren. Die dritte Klassifizierung betrifft die der semi-quantitativen Verfahren, die die Wirkung von Politikinstrumenten in vereinfachter Form versuchen zu quantifizieren. Die vierte und aufwendigste Stufe stellen quantitative Modellierungsverfahren dar. In Kapitel 2 dieses Berichts werden diese verschiedenen methodischen Herangehensweisen genauer beleuchtet. An dieser Stelle sei erneut auf die Reihe Climate Change 41/2023 verwiesen, in der die Modellierungsansätze der Wirksamkeitsanalysen eingeführt werden (Schünemann et al., 2023).

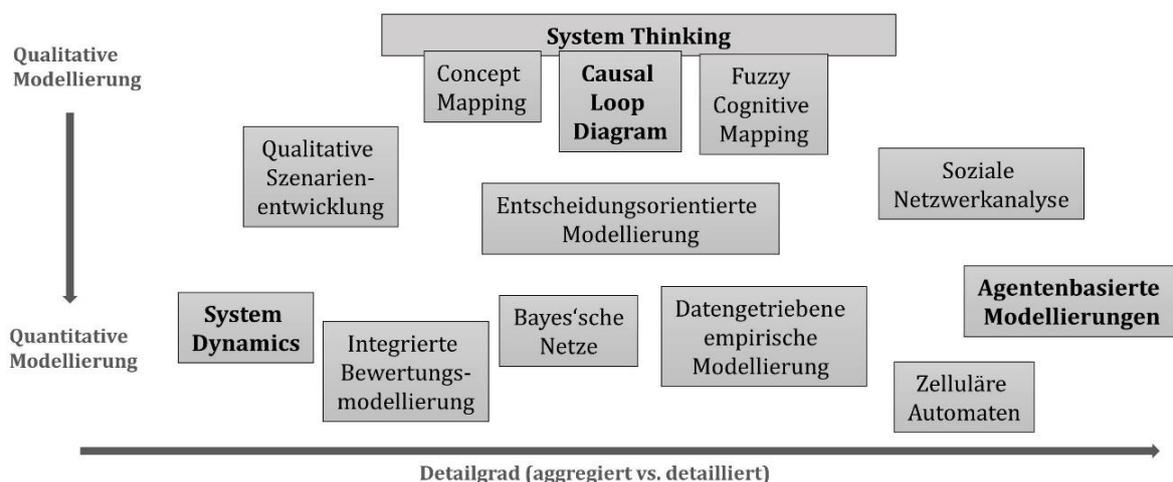
## 2 Systemmodellierungsmethoden zur Analyse der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten

Dieses Kapitel beschreibt knapp, welche Modellierungsverfahren die Lenkungswirkung von Politikinstrumenten in komplexen Systemen wie der Klimaanpassung bewerten können. Eine umfassendere Methodendarstellung hierzu wurde im Bericht Climate Change 41/2023 vorgenommen (Schünemann et al., 2023).

Im Allgemeinen werden Systemmodellierungen nach Art der Datenerhebung und -verarbeitung kategorisiert. Meist wird zwischen *qualitativen* und *quantitativen* Ansätzen unterschieden. Die Literaturrecherche ergab allerdings auch, dass es weder eine homogene Klassifizierung oder Terminologie der verschiedenen Modellierungsansätze, noch ein einheitliches schematisches Verfahren zum Testen der Anwendbarkeit einer „idealen“ Modellierungsmethode gibt (Adelle et al., 2012; J. M. Badham & Gilbert, 2015; Ritchey, 2012; Voinov et al., 2018a). Infolgedessen eignen sich in der Regel mehrere Systemmodellierungsmethoden für dieselbe Fragestellung und beleuchten diese aber auf verschiedene Art und Weise. Die Auswahl der jeweils passfähigsten Methode muss daher immer flexibel entschieden werden. Sie hängt in der Praxis auch wesentlich davon ab, wie präzise eine Problemstellung eingegrenzt wird, was das anvisierte Ziel ist und ob das erwartete Ergebnis die teils beträchtlich hohen zeitlichen, personellen und technischen Ressourcen rechtfertigt.

Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der vorab identifizierten wesentlichsten Systemmodellierungsansätze (Schünemann et al., 2023). Dabei wurden die Modellierungsmethoden auf der y-Achse nach Art der Datenerhebung und der Ergebnisform (qualitativ-beschreibende Modellierung zu quantitativer Modellierung inklusive dynamischer Simulation) und auf der x-Achse nach im Modell abgebildeten Detailgrad eingeordnet. Letzterer gibt an, ob sich die Modellierungsmethode üblicherweise eher für aggregierte (Top-Down; Wirkungszusammenhänge) oder detaillierte (Bottom-Up, individuelle Wechselwirkungen) Betrachtungen von komplexen Fragestellungen eignet. Die hervorgehobenen Konzepte wurden letztendlich für die exemplarischen Modellierungen in Kapitel 4 ausgewählt. Sie werden im weiteren Verlauf dieses Berichts eingehender erörtert.

**Abbildung 4: Überblick über die qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Systemmodellierungsmethoden zur Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

## 2.1 Qualitative Systemmodellierungsmethoden

Qualitative Verfahren werden auch als *Konzeptualisierungsmethoden* oder „*soft methods*“ bezeichnet. Die Variablen und Einflussgrößen im Modell werden nicht parametrisiert. Aus diesem Grund erscheinen sie oft „unschärfer“ als quantitative Ansätze. Aufgrund des deutlich geringeren Aufwandes zur Erstellung qualitativer Modelle sind sie trotzdem ein bewährtes Tool in der Entscheidungsfindung und Politikberatung. Qualitative Methoden versuchen vor allem die ganzheitliche Struktur komplexer Systeme abzubilden und so tiefere Verständnisse der Systemzusammenhänge zu erlangen. Dazu erlauben sie die Implementierung inter- und transdisziplinärer Zugänge und die Einbindung mentaler Modelle von Stakeholdern.

Im Zusammenhang mit der Frage nach einer Eignung qualitativer Systemmodellierungen im Kontext der Klimaanpassung konnte das Paradigma des *Systems Thinking* identifiziert werden. Das *Systems Thinking* beinhaltet qualitative Systemmodellierungsmethoden, von denen zwei, *Concept Mapping* und *Causal Loop Diagram*, hier vorgestellt werden.

Das *Systems Thinking* fokussiert auf die qualitative Analyse komplexer Systeme und integriert verschiedenste interdisziplinäre Faktoren. Mit *Systems Thinking* Methoden können Kausalbeziehungen in komplexen sektorenübergreifenden Zusammenhängen schnell strukturiert und visualisiert werden. Es zeigt Synergien und potentielle Nebeneffekte auf. Dadurch können Auswirkungen von politischen Maßnahmen durch „Was-wäre-wenn“-Szenarien untersucht werden. Anwendungseinschränkungen mit *Systems Thinking* ergeben sich dadurch, dass sich die Methoden dieser Gruppe nicht quantitativ überprüfen lassen.

*Concept Mapping* wurzelt im *Systems Thinking*. Es visualisiert und strukturiert das mentale Modell (Systemverständnis) mehrerer Personen rund um *eine* zentrale, komplexe Problemstellung. Es zeigt auf, welche relevanten Faktoren das Problem beeinflussen und inwiefern diese untereinander in Beziehung stehen. Um *Concept Mapping* zu nutzen, braucht es keine oder nur eine begrenzte wissenschaftliche Datenbasis. Oftmals reicht die Expertise oder das Praxiswissen der Stakeholder und Beteiligten. Dieser Vorteil ist aber auch eine Limitierung, denn somit ist das Modell nicht gegen falsche Vorstellungen oder Unwissen gefeit. Diesem Dilemma kann man durch die Einbindung einer möglichst großen Zahl an Akteuren entgegenwirken.

Auch mit *Causal Loop Diagrams* lassen sich zentrale Modellierungsfragen qualitativ untersuchen. Allerdings beschreibt es nicht nur sich gegenseitig beeinflussende Faktoren, sondern erweitert diese Betrachtung und differenziert und klassifiziert zwischen verstärkenden und ausgleichenden Rückkopplungsschleifen (*Feedback Loops*). Auf diese Weise kann gezeigt werden, wie sich Veränderungen bei einem Faktor auf andere Faktoren (z. B. Indikatoren zur Bewertung der Wirksamkeit des Politikinstrumentes) auswirken. Somit legt es den Schwerpunkt auf das nicht-lineare und dynamische Verhalten von Wirkungszusammenhängen. *Causal Loop Diagrams* können mit der partizipativen Gruppenmodellierung (*Group Model Building*) erstellt werden (Hovmand, 2014). Genau wie beim *Concept Mapping* können dabei fehlerhafte mentale Modelle die Qualität beeinträchtigen. Diesen Nachteil kann man ebenfalls durch die Einbindung einer größeren Zahl an Akteuren oder durch eine umfangreiche Recherche begrenzen.

## 2.2 Semi-quantitative Systemmodellierungen

Manche quantitative Systemmodellierungsmethoden beruhen auf qualitativen oder halbqualitativen Daten und werden deshalb als semi-quantitative Methoden bezeichnet. Dieser Abschnitt stellt die für die Projektfrage infrage kommenden Herangehensweisen vor, bei denen die Grenze zwischen qualitativ und quantitativ flexibel ist.

*Fuzzy Cognitive Mapping* ist eine semi-quantitative Methode, die auf der qualitativen Concept Mapping Methode (aus dem Bereich Systems Thinking) aufbaut und die Stärke des Einflusses zwischen Variablen bewertet. Damit können einfache Modelle erstellt werden, die zusätzliche Erkenntnisse und Konzepte zu einer Modellierungsfrage liefern und gleichzeitig die Abhängigkeiten zwischen Konzepten visualisieren können. Obwohl sie keine detaillierte quantitative Analyse bietet, ermöglicht Fuzzy Cognitive Mapping eine erklärende Modellierung von Systemverhalten aufgrund von sich ändernden Faktoren. Auch können Auswirkungen zu politischen Maßnahmen in „Was-wäre-wenn-Szenarien“ überprüft werden.

Mittels der *Social Network Analysis (SNA)* können sowohl die sozialen Strukturen einer Gemeinschaft als auch die Interaktionen zwischen Akteuren oder Gruppen innerhalb eines Netzwerks analysiert werden. SNA verwendet mathematisch-stochastische Gleichungen aus der Graphentheorie, um die Beziehungen zwischen Akteuren zu bewerten. Zudem bieten sie Einblicke in die soziale Struktur und Verbindungen innerhalb eines Systems. Diese Methode kann aber auch qualitativ genutzt werden – ohne Parametrisierung. Daher ordneten wir SNA der semi-qualitativen Systemmodellierung zu. SNA kann zur Verbesserung der Akzeptanz gesellschaftlicher Innovationen beitragen und eignet sich besonders für die Identifizierung der Netzwerkstrukturen von Akteuren, die Optimierung der Koordination und die Analyse des Wissenstransfers. Einschränkungen können jedoch bei der Gewichtung von Beziehungen entstehen.

Die *Szenarienentwicklung* wird genutzt, um entweder qualitativ oder quantitativ plausible Zukunftsszenarien für z. B. die Auswirkung verschiedener Politikinstrumente zu erstellen. Diese Szenarien helfen Entscheidungsträger\*innen, Veränderungen im Umfeld besser zu verstehen und politische Problemlagen genauer wahrzunehmen. Im politischen Entscheidungsprozess können derartige Szenarien eine breitere Beteiligung von gesellschaftlichen Akteuren und offene Diskussionen anregen, aber auch konkrete operative Unterstützung bieten. Allerdings kann die Szenarienentwicklung keine quantitativen Vorhersagen treffen und ist immer auf eine Kombination mit anderen Methoden angewiesen.

*Entscheidungsorientierte Modellierung (Decision-focused Structuring)* ist ein Ansatz, der sich auf die Abfolge von Entscheidungen und ihre Auswirkungen auf die Systementwicklung in der Zukunft (Zukünfte) konzentriert. Diese Methode kann qualitativ, semi-quantitativ und quantitativ sein. Sie wird in der Politikgestaltung eingesetzt, um alternative Routen zur Erreichung eines Ziels unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu identifizieren. *Dynamic Adaptive Policy Pathways* ist eine damit verbundene Methode, die sich auf dynamischen Wandel und die Wirkung von Maßnahmen konzentriert, um flexible Pläne für die Zukunft zu entwickeln. Diese Methoden sind in erster Linie für die Planung und Entscheidungsunterstützung geeignet und nicht für die dynamische Simulation oder Vorhersage.

## 2.3 Quantitative Systemmodellierungen

Diese Methoden basieren auf Formeln, Entscheidungsregeln oder stochastischen Beschreibungen, um die Beziehungen zwischen Systemkomponenten quantitativ abzubilden. Es gibt zwei Hauptansätze:

- ▶ die stochastische Beschreibung, die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Zielgrößen unter Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet, und
- ▶ die zeitaufgelöste Simulation, die das dynamische Verhalten des Systems und der Zielgrößen darstellt, erfordert jedoch eine präzise Quantifizierung.

Die größten Herausforderungen bestehen darin, qualitativ hochwertige Daten für die Modellierung einzubeziehen und die Ergebnisse für externe Stakeholder und Beteiligte verständlich zu kommunizieren. Die quantitativen Ansätze können in Top-Down (Systemebene) und Bottom-Up (Akteursebene) unterteilt werden.

*System Dynamics* ist eine Methode zur Modellierung und dynamischen Simulation komplexer Systeme und Prozesse. Ihr Schwerpunkt liegt auf der Analyse der Wechselwirkungen zwischen makroskopischen bzw. aggregierten Variablen (keine individuellen Entscheidungen auf Mikroebene) eines Systems, wobei Rückkopplungen eine signifikante Rolle spielen und nicht-lineare Effekte berücksichtigt werden. Dieser Ansatz zielt darauf ab, ein tiefes Verständnis komplexer Systemdynamiken zu entwickeln, nicht beabsichtigte Nebeneffekte aufzuzeigen und Lösungsansätze zur gewünschten Verhaltensänderung zu finden. Die Einbeziehung des Verständnisses verschiedener Beteiligte und Stakeholder sowie partizipative Modellierungsansätze stärken das Vertrauen in die Modelle und erhöhen deren Relevanz in Entscheidungs- und Politikprozessen. Dabei basieren System Dynamics-Modelle auf einer Struktur von Beständen, Zu- und Abflüssen, Variablen und Verbindungen, wobei eine valide Quantifizierung der Modellstruktur und ausreichende Daten entscheidend sind. Sie dienen dazu, die zeitliche Entwicklung des Systemverhaltens in der Zukunft zu visualisieren und ermöglichen ein besseres Verständnis von Entscheidungen und ihren Auswirkungen auf komplexe Systeme.

*Agent-Based Modelling (ABM)* ist eine Methode zur Simulation sozialer Interaktionen innerhalb komplexer Systeme auf Mikroebene, wodurch das dynamische Verhalten von Agenten, darunter Menschen, Tiere oder Objekte, unter dem Einfluss sich wandelnder Faktoren modelliert wird. ABM berücksichtigt Eingaben wie Agenten, den Raum, die theoretische Grundlage für das Agentenverhalten und Regeln für die soziale Interaktion. Die Ausgabe dieser Methode ist eine Simulation, die das zeitliche Verhalten des Systems beschreibt und die komplexen sozialen Interaktionen zwischen den Individuen im Systemverhalten widerspiegelt. ABM ist besonders nützlich für die Modellierung dezentraler, autonomer Entscheidungsfindung, bei der das Systemverhalten aus dem emergenten Verhalten der Agenten entsteht. Eine Herausforderung bei ABM besteht in der Beschaffung vieler Daten zur Beschreibung der Interaktionen innerhalb des Systems, einschließlich detaillierter Informationen über die Verteilung von Verhaltensweisen und Verbindungen im System sowie aggregierte Systemdaten für die Modellkalibrierung.

*Cellular Automata (CA)* ist eine Methode zur Modellierung von Zustandsänderungen in einer räumlichen Umgebung, bei der Zellen, die Objekte und Prozesse im System darstellen, in einem Gitterfeld angeordnet sind. Jede Zelle ändert ihren Zustand in jedem Zeitschritt nach den Modellregeln. Die Methode ist vergleichbar mit ABM, jedoch mit immobilen Agenten. CA ermöglicht quantitative Prognosen, bezieht räumliche und dynamische Komponenten ein und lässt sich leicht mit anderen Modellierungstechniken integrieren. Diese Methode wird oft für die Modellierung von Landnutzungsänderungen, im Verkehrssektor und zur Simulation städtischer

Phänomene verwendet, hat aber auch Herausforderungen in Bezug auf die Generierung qualitativ hochwertiger Daten für die Interaktion zwischen den Zellen.

*Bayes'sche Netze* repräsentieren die Beziehungen zwischen Modellvariablen probabilistisch und werden als Graphen mit Knoten dargestellt. Sie ermöglichen die Modellierung komplexer Zusammenhänge und Abhängigkeiten in Systemen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, die beispielsweise aus Umfragen, Expert\*innenmeinungen und Klimaprognosen stammen. Bayes'sche Netze können auch als Agent-Based Modelle interpretiert werden, obwohl sie aufgrund ihrer nicht-trivialen Struktur und anfänglich nicht intuitiven Verständlichkeit unterschätzt und wenig genutzt werden. Sie sind nützlich für Entscheidungsunterstützung und Managementanwendungen mit Unsicherheiten und können qualitative und quantitative Daten kombinieren, haben jedoch Schwierigkeiten bei der expliziten Modellierung räumlicher und zeitlicher Dimensionen sowie der Implementierung von nicht-linearen Dynamiken.

*Empirische Modellierung (EM)* verwendet verschiedene Verfahren, darunter heuristische Ansätze, numerische Näherungen wie Regressionen und maschinelles Lernen, um Modelle aus Beobachtungen und Experimenten zu erstellen. Maschinelles Lernen, ein Bereich der künstlichen Intelligenz, umfasst überwachtes, unüberwachtes, teilüberwachtes und verstärkendes Lernen. Zu den maschinellen Lernverfahren gehören Methoden wie Deep Learning, die sich auf tiefe künstliche neuronale Netze stützen. EM-Anwendungen umfassen Predictive Modeling, Verhaltensmodellierung und Data Mining, erfordern jedoch ausreichend Trainingsdaten. Der "Black-Box"-Charakter von maschinellem Lernen erschwert die Interpretation von Modellen, auch kann der Rechenaufwand beim Training ein Problem darstellen.

## 2.4 Hybride Systemmodellierungen

Hybride Systemmodellierung bezieht sich auf die Kombination verschiedener Modellierungsansätze und -methoden. Diese kann die Kombination von qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen sowie die Integration von Modellen aus verschiedenen Disziplinen und Sektoren umfassen. Die Art der Kopplung zwischen den Modellkomponenten kann lose oder eng sein, je nachdem, ob die Modelle separat arbeiten oder gemeinsam Eingaben und Ergebnisse nutzen. Hybride Modelle können auch semiparametrische Ansätze verwenden, bei denen KI-Modelle mit parametrischen Modellen kombiniert werden, um die Vorteile von Big Data und maschinellem Lernen mit interpretierbaren Modellen zu verbinden.

Diese Art der Modellierung findet Anwendung in integrierten Bewertungssystemen, die verschiedene Modelle zur Analyse komplexer Systeme miteinander verknüpfen. Die Limitierungen von hybrider Modellierung umfassen die Herausforderungen bei der Verknüpfung vorhandener Modelle und die Anpassung von Variablen, Skalen und Auflösungen.

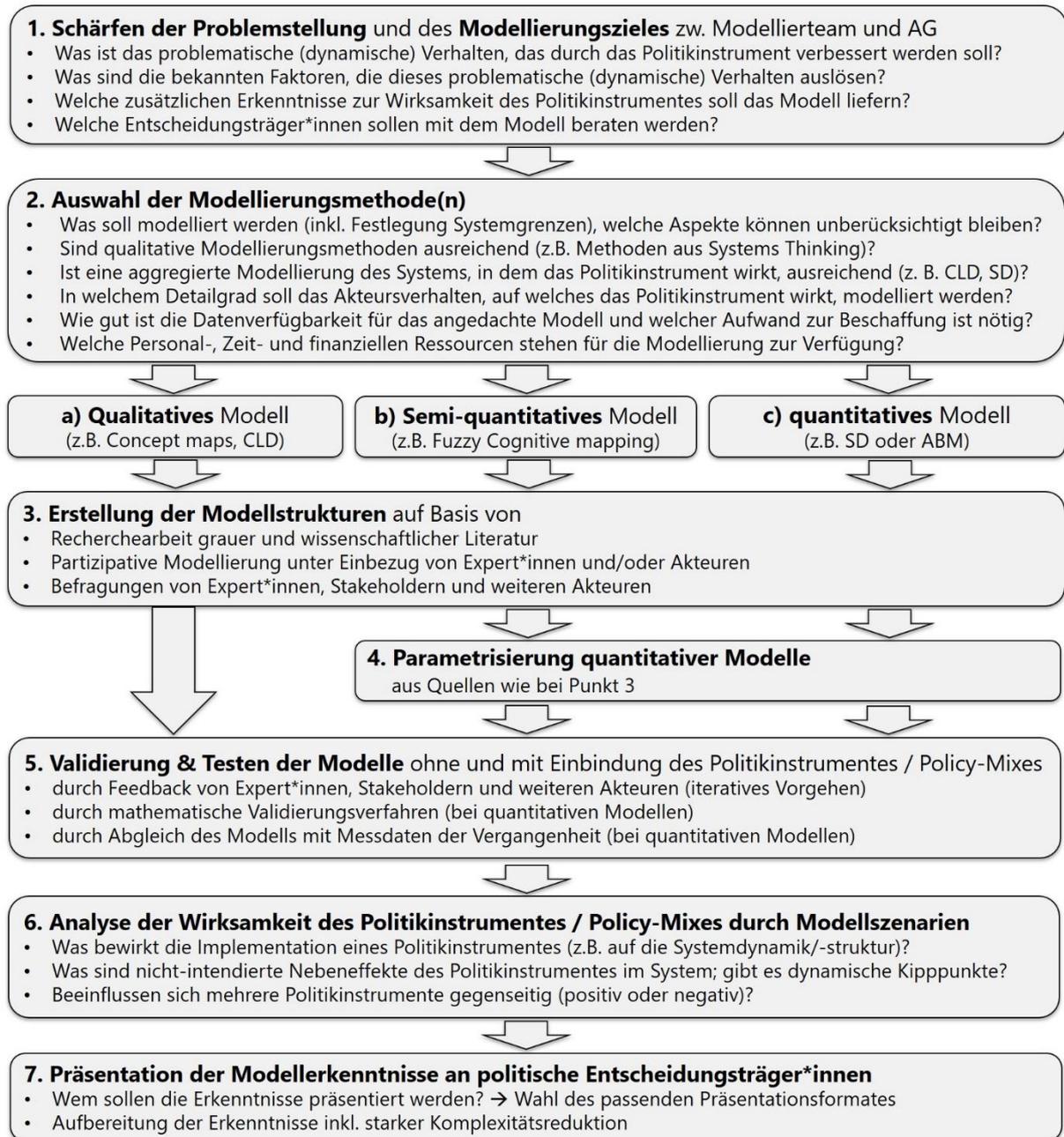
## 3 Konzept zum Einsatz von Systemmodellen zur Bewertung von Politikinstrumenten

### 3.1 Der Modellierungsprozess

Die Literaturrecherche zu den Modellierungsansätzen innerhalb der Politikberatung hat ergeben, dass es für Politikmodellierungen aufgrund ihrer individuellen Gestaltung innerhalb des Prozesses der Politikberatung keinen typischen oder standardisierten Prozess gibt (Schünemann et al., 2023). Allerdings haben unsere Recherchen und der Austausch mit Expert\*innen auf dem Gebiet der Politikmodellierung auch gezeigt, dass sich ein „idealer“ Modellierungsprozess abbilden lässt, der in seiner Abstraktion die meisten Politikmodellierungsprozesse beschreibt. Voinov (2018) hat hierzu einen Aufschlag gemacht und den Modellierungsprozess in verschiedene Schritte aufgeteilt. Basierend auf diesem Vorschlag haben wir in Abbildung 5 versucht, die verschiedenen Phasen eines Modellierungsprozesses zur Analyse der Wirkung von Politikinstrumenten als Prozessschema darzustellen. Dieses ist allgemein gehalten und gilt daher für alle zuvor genannten Modellierungsansätze, unabhängig davon, ob es sich um qualitativ, semi-quantitativ oder quantitativ, mikro- oder makroskalige Modellierung, stochastische Modellierung oder Simulation handelt. Das Schema verdeutlicht den Modellierungsprozess und soll zum Verständnis beitragen, welche Schritte notwendig sind, um ein valides Politikmodell zu erstellen. Jeder Schritt erfordert ein anderes Maß an Aufwand, weshalb sich einige Modelle schneller und leichter, andere länger und schwerer erstellen lassen. Die im Schema dargestellten grundlegenden Schritte sind jedoch dieselben. Das Schema beruht auf Erkenntnissen ausgiebiger Literaturrecherchen und auf eigenem Erfahrungswissen. Im Folgenden werden die verschiedenen Prozessschritte abschnittsweise näher erläutert.

**Abbildung 5: Vereinfachtes Schema eines üblichen Prozesses zur Erstellung von Systemmodellen für die Bewertung von Politikinstrumenten innerhalb der Politikberatung**

**Schema eines vollständigen Modellierungsprozesses**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

**3.1.1 Schärfen der Problemstellung und des Modellierungszieles**

Der erste Schritt des Modellierungsprozesses ist die Schärfung der Problemstellung zwischen Auftraggeber\*innen (AG) und Modellierungsteam (MT). Dabei soll ergründet werden, welches beobachtete problematische (dynamische) Verhalten modelliert und welche Wirkung von

Politikinstrumenten<sup>1</sup> in dem Modell bzw. den Modellen analysiert werden soll. Dabei kann es zwischen AG und MT zu Missverständnissen darüber kommen, was unter einem System verstanden wird, was Modellierungen leisten können und was nicht, wie die Politikinstrumente in die Modellierung eingebunden werden etc. Hier ist vom MT zu Beginn des Modellierungsprozesses Aufklärungsarbeit beim AG<sup>2</sup> und den am Prozess beteiligten Akteuren zu leisten, die von großer Relevanz für eine erfolgreiche und die Entscheidungsfindung unterstützende Modellierung ist. Im Weiteren sollte das MT gemeinsam mit dem AG die bekannten Faktoren, die dieses problematische Verhalten auslösen, erfassen und diskutieren, wie diese im Modellierungsprozesse abgebildet werden können. Ebenso wichtig ist es, mit dem AG zu klären, welche zusätzlichen Erkenntnisse zur Wirksamkeitseinschätzung des Politikinstrumentes das Modell liefern soll. Diese Einschätzung muss berücksichtigen, welche weiteren Ansätze verfolgt werden, um die Wirksamkeit des Instrumentes einzuschätzen (z. B. Expert\*innen-Einschätzungen). Auch hier ist vom MT darauf hinzuweisen, was Modelle leisten können und was nicht. Dies beinhaltet schon Teile des zweiten Schritts des Modellierungsprozesses „Auswahl der Modellierungsmethode(n)“, da die Modellierungsmethoden ganz unterschiedliche Aspekte beleuchten und Analysetiefen zur Wirksamkeit von Politikinstrumenten aufweisen. Für das MT ist es in dem Zusammenhang ebenso relevant zu berücksichtigen, welche Entscheidungsträger\*innen mit dem Modell beraten werden sollen.

### 3.1.2 Auswahl der passfähigsten Systemmodellierungsmethode(n)

Verwoben mit dem ersten Schritt des Modellierungsprozesses (Bestimmung des Modellierungszieles) ist der zweite Schritt der „Auswahl der [passfähigen] Modellierungsmethode(n)“ zur Bewertung des Politikinstrumentes. Dabei stellt das MT dem AG vor, welche Modellierungsmethoden zur Abbildung des problematischen Systemverhaltens und der Analyse der Wirkung des Politikinstrumentes existieren und welche für das Vorliegende in die engere Auswahl kommen. Die Wahl des am besten geeigneten Modellierungsansatzes bzw. auch die Kombination mehrerer Ansätze ist keineswegs trivial. Das MT muss dafür ein sehr gutes Wissen zu Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Ansätze aufweisen und dabei folgende Fragestellungen berücksichtigen:

- ▶ *Was genau soll modelliert werden?* Hierfür sind die identifizierten Faktoren, die das problematische Verhalten beeinflussen, das durch das avisierte Politikinstrument vermindert werden soll, von großer Relevanz. Dies beinhaltet auch den kritischen Punkt der Festlegung der Systemgrenzen des Modells, d. h., welches Teilsystem bzw. Teilaspekt des gesamten komplexen Systems notwendigerweise betrachtet werden muss, um die Wirksamkeit des Politikinstrumentes einzuschätzen. An dieser Stelle erfolgt die Abwägung, inwieweit die im Modell berücksichtigte Komplexität reduziert werden darf, ohne jedoch entscheidende Prozesse bzw. Faktoren, die das Politikinstrument beeinflussen, zu vernachlässigen.
- ▶ *Sind qualitative Modellierungsmethoden zur Bewertung der Wirksamkeit des Politikinstrumentes ausreichend?* Hierzu muss die Frage gestellt werden, ob z. B. qualitative Ansätze des Systems Thinking (CLD, Concept Maps, etc.) ausreichend sind, um die Wirkung des Politikinstrumentes qualitativ zu beschreiben. Diese Frage sollte in der Tiefe diskutiert werden, da der Aufwand zur Erstellung valider quantitativer Modelle, v. a. dynamischen Simulationen (wie ABM oder SD), deutlich höher ist als für qualitative Modelle (inkl. Konzeptualisierungsmodelle). Dies wird im Abschnitt 3.2 näher ausgeführt.

---

<sup>1</sup> Fortfolgend sind bei Politikinstrumenten auch Policy-Mixes gleichwertig mit gemeint.

<sup>2</sup> Im Folgenden enthält AG sowohl Auftraggeber\*in als auch am Modellierungsprozess beteiligte Akteure.

- ▶ *Ist eine aggregierte Abbildung des Systems, in dem das Politikinstrument wirkt, ausreichend?* Dies beinhaltet die Festlegung, ob individuelles Akteursverhalten, räumliche Auflösung oder weitere detaillierte Prozesse und Entscheidungen abgebildet werden sollen oder ob der Fokus eher auf Systemzusammenhängen bzw. aggregierten Betrachtungen, z. B. von Gesellschaften, liegt. Während sich für Ersteres Modellierungsmethoden wie ABM, Bayesian Networks oder SNA eignen, sind zur aggregierten Abbildung von Systemzusammenhängen und Analyse von Systemstrukturen eher Systems Thinking Methoden oder SD geeignet. Diese Entscheidung ist von großer Tragweite und beinhaltet auch den nächsten Punkt.
- ▶ *In welchem Detailgrad soll bzw. muss das Akteursverhalten, auf welches das Politikinstrument wirkt, modelliert werden?* Wie im Kapitel 1 erwähnt, beinhaltet das die Frage, mit welchen Ansätzen das Verhalten im Modell abgebildet werden kann. Dies geschieht auf sehr unterschiedlichen Wegen, auch abhängig von der Wahl der Modellierungsmethoden. Während bei ABM Entscheidungsregeln der Agent\*innen (z. B. Beteiligte) individuell festgelegt werden und somit Heterogenität der Agent\*innen abgebildet werden kann, ist das Verhalten von Akteuren in SDM aggregierter und spiegelt so eher durchschnittliches Verhalten von Akteursgruppen, z. B. in Gesellschaften, wider.
- ▶ *Wie gut ist die Datenverfügbarkeit für das angedachte Modell und welcher Beschaffungsaufwand ist nötig?* Auch diese Fragestellung ist von unerlässlicher Bedeutung zur Wahl des geeignetsten Modellierungsansatzes. Die Beschaffung qualitativer Daten für die Erstellung eines CLD aus der Systems Thinking Toolbox ist mit deutlich weniger Aufwand verbunden als die der quantitativen Daten für ein SDM. Datenerhebung für ein ABM, das auf individuellen und zu parametrisierenden Entscheidungsregeln basiert, ist eventuell sogar noch aufwendiger. Dies wird im Abschnitt 3.2.3 näher ausgeführt.
- ▶ *Welche personellen, zeitlichen und finanziellen Ressourcen stehen für die Modellierung zur Verfügung?* Dieser in der Praxis der Politikberatung wohl wesentlichste Punkt ist die Frage danach, welche Ressourcen der AG dem MT zur Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten zur Verfügung stellt. Neben dem benötigten Personal mit seiner fachlichen Expertise und den finanziellen Ressourcen betrifft dies vor allem den Zeitraum, in dem das Modell Erkenntnisse liefern muss. Da Politikinstrumente teilweise sehr schnell umgesetzt werden, ist die Zeitspanne für eine Modellierung möglicherweise sehr gering. Dies kann dazu führen, dass aufwendige quantitative Modellierungsmethoden wie ABM oder SD nicht zum Einsatz kommen können, auch wenn sie (gemessen an den vorherigen Punkten) am passfähigsten sind. Dann wären qualitative oder semi-quantitative Modellierungen wie CLD oder Fuzzy Cognitive Mapping in der Anwendung realistischer, da die Modellerstellung aufgrund nicht benötigter oder geringer Parametrisierung deutlich schneller gelingen kann. Dies wird im Abschnitt 3.2 eingehender erläutert.

Nach Berücksichtigung dieser Punkte erfolgt die Auswahl der Modellierungsmethode, bei der es sich, wie in Abbildung 4 dargestellt, um einzelne qualitative, semiquantitative oder quantitative Systemmodellierungsansätze oder auch um eine Kombination von Ansätzen und Methoden handeln kann.

### **3.1.3 Erstellung der Systemmodellstrukturen**

Ist die passendste Systemmodellierungsmethode bzw. deren Kombination ausgewählt und das Modellierungsziel definiert, erstellt das MT die Struktur des Modells. Damit ist bei qualitativen Modellen des Systems Thinking die Systemstruktur durch Variablen (Beispiel für CLD siehe Abschnitt 4.5.1), für quantitative Modelle die Variablen, die im nächsten Schritt parametrisiert

werden müssen, gemeint (Bsp. für Entscheidungsregeln in ABM siehe Abschnitt 4.5.3, Bsp. für Gleichungen in SDM siehe Abschnitt 4.5.2). Die für die Modellierung benötigten Variablen und Systemgrößen kann das MT aus verschiedenen Quellen beziehen:

- ▶ *Über Recherchearbeit unter Einbezug wissenschaftlicher und grauer Literatur zu dem Modellierungsthema:* Ist dies die ausschließliche Quelle, besteht die Gefahr, dass relevante Variablen für die Modellierung, die bei der Recherche nicht identifiziert wurden, auch nicht im Modell berücksichtigt werden und das Modell dadurch keine validen Erkenntnisse zur Wirksamkeit der Politikberatung liefern kann.
- ▶ *Durch Einbezug von Expert\*innen und/oder Akteuren in einem partizipativen Modellierungsprozess:* Hierbei wird das umfangreiche Systemwissen von in den Modellierungsprozess einbezogenen Expert\*innen und weiteren Akteuren zu dem modellierenden Themenfeld (mentale Modelle) in das Modell miteinbezogen. Dies kann v.a. bei komplexen Themen der Fall sein, bei denen das interdisziplinäre Wissen von Expert\*innen oder das transdisziplinäre Wissen von Praxisakteuren für die Variablen- und Systemgrößenfindung des Modells sehr erfolgversprechend ist (Hovmand, 2014). Wie weit der Einbezug der Expert\*innen und anderen Beteiligten in den Modellierungsprozess reicht, kann je nach vorhandenen Kapazitäten festgelegt und sehr unterschiedlich gestaltet werden. Im Bereich von SD gibt es mit dem *Group Model Building* einen sehr gut erprobten Ansatz zur partizipativen Modellierung von CLD oder SDM. Dabei können die Variablenfindung, das Auffinden der Verbindungen zwischen den Variablen und auch die Parametrisierung gemeinsam mit den Expert\*innen und Akteuren durchgeführt werden. Diese Modellierungsworkshops können auch genutzt werden, um die Resultate des Modells mit den Beteiligten gemeinsam zu validieren. Der Erfolg der partizipativen Modellierung hängt dabei sehr stark vom Wissen der Beteiligten sowie von der Moderation der Workshops ab (Einbezug der Beteiligten). Das Modell kann dabei das betrachtete System nur so gut widerspiegeln, wie das Systemwissen (mentale Modell) der Beteiligten ist. Vorteile dieser Methode sind, dass evtl. eingebundene Entscheidungsträger\*innen die Komplexität des Themas besser erfassen, ihr mentales Modell erweitern, sich besser mit dem Modell identifizieren und den Erkenntnissen des Modells eher vertrauen (Scott, 2018).
- ▶ *Befragungen von Expert\*innen, Stakeholdern und weiteren Akteuren:* Dies ist eine im Vergleich zum vorherigen Punkt vereinfachte Einbindung von inter- und transdisziplinärem Wissen von am Modellierungsthema beteiligten Akteuren und Stakeholdern. Dabei können z. B. durch strukturierte oder unstrukturierte Interviews oder Ausfüllen von Fragebögen das unterschiedliche Wissen zusammengetragen und in das Modell eingebunden werden.

Generell ist die Herausforderung, das komplexe System, in dem das Politikinstrument wirkt, so umfassend wie nötig, jedoch so vereinfacht wie möglich als Modellstruktur zu beschreiben. Hinzu kommt die Anforderung, die Modellstruktur möglichst ohne Bias – das heißt, ohne Einbindung des Wertesystems des MT, des AG bzw. der am Modellierungsprozess Beteiligten – zu erstellen.

### 3.1.4 Parametrisierung quantitativer Systemmodelle

Die Parametrisierung betrifft nur quantitative bzw. semi-quantitative Modelle und beschreibt die Implementierung von quantitativen Daten in diese Modelle. Das beinhaltet z. B. die Festlegung von Wichtungsfaktoren oder Variablen in SDM bzw. in stochastische Modelle sowie die Quantifizierung von Entscheidungsregeln mit quantitativen Schwellwerten im Fall von ABM. Das Auffinden der benötigten Daten für die Modelle kann sehr ressourcenintensiv werden, v. a.,

wenn diese Daten nicht in der benötigten Qualität oder Auflösung vorliegen. Dies ist häufig der Fall, wenn es um die Quantifizierung sogenannter „*Soft Variables*“, also sozialer Variablen, geht. Beispiele sind das Verhalten von Akteuren auf Politikinstrumente oder Entscheidungsregeln von Akteuren, die eine Reaktion auf sich ändernde äußere Umstände abbilden. Zur Beschaffung der notwendigen Daten stehen dem MT normalerweise ähnliche Möglichkeiten zur Verfügung wie zur Erstellung der Modellstrukturen. Das sind Recherchen wissenschaftlicher und grauer Literatur, Datenbanken, die partizipative Modellierung unter Einbezug von Expert\*innen und/oder Akteuren oder die Befragungen von Expert\*innen, Stakeholdern und weiteren Akteuren. Es ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass dieser Schritt bei den quantitativen Modellen meist sehr aufwendig und ressourcenintensiv ist. Dies ist bei dynamischen Simulationsmodellen wie ABM und SD üblicherweise höher als bei stochastischen oder semi-quantitativen Modellen. Qualitative Modelle haben den Vorteil, dass dieser Arbeitsschritt entfällt oder nur zur Unterstützung der Modellaussagen genutzt wird. Dafür erlauben quantitative Modelle meist ein tiefergehendes Verständnis des komplexen Systems und der Auswirkung von Politikinstrumenten auf dieses.

### 3.1.5 Validierung & Testen der Systemmodelle

Für die Aussagekraft und Anwendbarkeit von Modellen in der Politikberatung ist die Validierung der Modelle äußerst wichtig. Da die Erstellung der Modelle immer mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist – u. a. abhängig von der Variable und der Modellierungsart – muss die Modellstruktur und das Modellverhalten vom MT genauer analysiert werden, bevor man den Modellergebnissen vertrauen kann. Dazu stehen dem MT folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- ▶ Das Feedback von Expert\*innen, Stakeholdern und weiteren Akteuren zu Modellstruktur, -verhalten und -ergebnissen einholen. Dies ist ein iteratives Vorgehen, bei dem das MT den Beteiligten das Modell mehrmals vorstellt und deren Feedback zur Weiterentwicklung und Verbesserung nutzt.
- ▶ Durch stochastische Validierungsverfahren (z. B. Varianzanalysen (ANOVA), Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen mit Hilfe des Monte Carlo Samplings (Sobol, 2001; Ten Broeke et al., 2016)) kann bei quantitativen Modellen die Robustheit geprüft werden. Häufig werden bei diesen Verfahren Parameter variiert und die Wirkung auf das Modellverhalten analysiert.
- ▶ Bei quantitativen Modellen ist der Abgleich des Modellverhaltens mit Messdaten ebenfalls ein übliches Vorgehen, um das Modell zu validieren. Dabei wird der Zeitverlauf von Variablen (z. B. Kenngrößen) im Modell mit Randbedingungen, welche die Vergangenheit repräsentieren, mit dem Verlauf von gemessenen Kenngrößen aus der Vergangenheit verglichen. Dabei wird angenommen, dass ein Modell, das die Vergangenheit gut widerspiegelt, ein valides Modell darstellt. Dies muss jedoch kritisch gesehen werden, da z. B. bei SDM auch falsche Parametrisierungen zu Verläufen von Kenngrößen führen können, die die Vergangenheit gut wiedergeben (Serman, 2000). Auch die Annahme, dass das Modell die Zukunft valide wiedergibt, weil es dies für die Vergangenheit tut, ist nicht unbedingt korrekt.

Das ausführliche Testen der Modelle ist ein wesentlicher Aspekt der Validierung, den das MT mit Sorgfalt durchführen sollte. Dies kann im ersten Schritt für das Modell ohne Einbindung des zu prüfenden Politikinstrumentes geschehen. Im zweiten Schritt kann die Wirkung des Instrumentes auf das Systemverhalten untersucht werden. Bezüglich des Aufwandes ist zu beachten, dass für quantitative Modelle üblicherweise ein deutlich höherer Aufwand zur Validierung notwendig ist als für qualitative Modelle.

### **3.1.6 Analyse der Wirksamkeit des Politikinstrumentes/Policy-Mixes durch Modellszenarien**

Das validierte Modell kann nun verwendet werden, um in Modellszenarien die Wirksamkeit des Politikinstrumentes tiefergehend zu analysieren. Dabei können, je nach Methoden, folgende Fragestellungen untersucht werden:

- ▶ Wie wirkt die Implementierung eines Politikinstrumentes z. B. auf die Systemdynamik (bei Simulationsmodellen (ABM, SD)), auf die Systemstruktur (z. B. bei Methoden des Systems Thinking) oder auf veränderte Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Entwicklungen (z. B. stochastische Modellierung)? Tritt die erwünschte Wirkung des Politikinstrumentes ein oder gibt es unerwünschte oder sogar positive Nebeneffekte?
- ▶ Was sind nicht-intendierte Nebeneffekte, die die Einbindung des zu analysierenden Politikinstrumentes im System mit sich bringen? Können eventuell sogar Kippunkte identifiziert werden, die das Instrument auslöst (bei dynamischen Simulationen)?
- ▶ Beeinflussen sich verschiedene Politikinstrumente im Rahmen eines Policy-Mix gegenseitig im positiven oder negativen Sinn?

Wie schon erwähnt, dienen die hier zur Anwendung kommenden Systemmodellierungsansätze zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten und nicht der Vorhersage der Zukunft. Dafür sind die untersuchten Systeme meist zu komplex (allein schon aufgrund ihrer Wirkung auf Beteiligte) und die zukünftigen Randbedingungen und Effekte schlichtweg unbekannt. Vielmehr dienen diese Modellierungen einer genaueren „Was-wäre-wenn“-Untersuchung, in der aufgezeigt wird, worauf zu achten ist, damit das Politikinstrument unter bestimmten Randbedingungen seine intendierte Wirkung zeigt und negative Nebeneffekte vermieden werden können. Trotz aller Sorgfalt bei der Modellierung bleiben die Aussagen der Modelle in einem gewissen Maß unscharf. Als erneuter Validierungsschritt empfiehlt sich die Diskussion der Modellergebnisse mit Expert\*innen auf dem Gebiet, involvierten Stakeholdern und Akteuren.

### **3.1.7 Präsentation der Modellerkenntnisse an politische Entscheidungsträger\*innen**

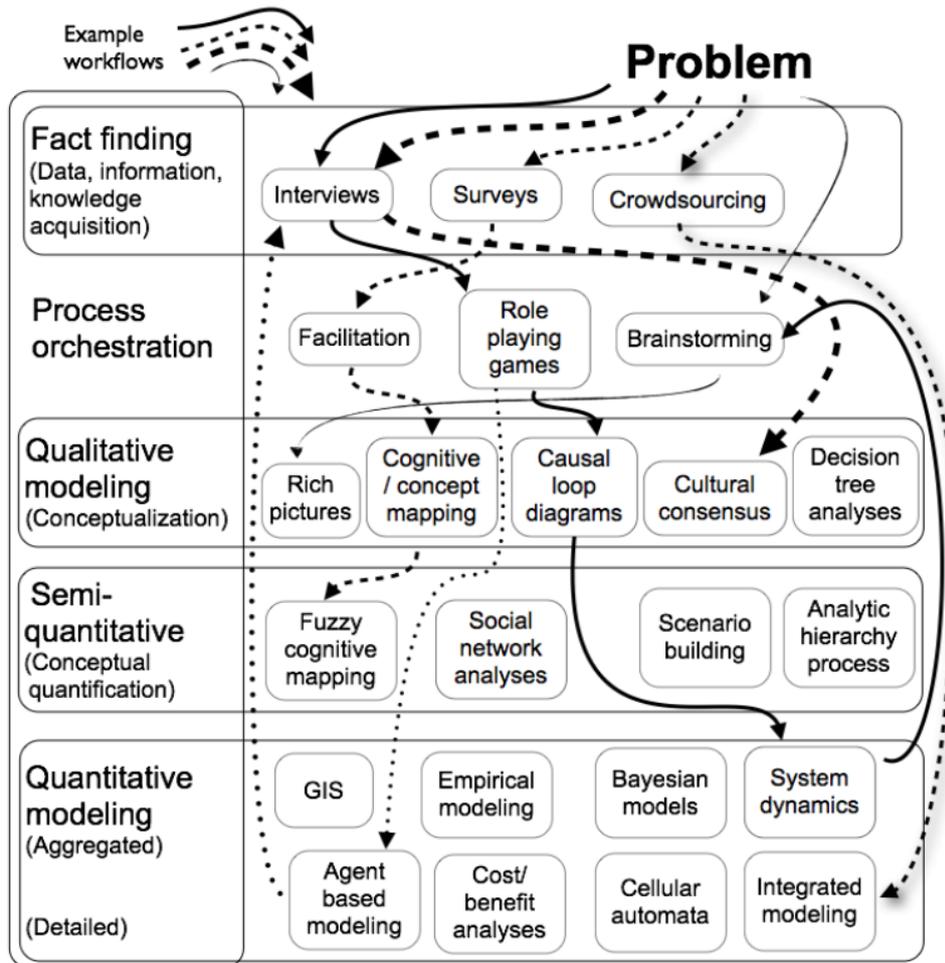
Ein gutes Modell wird keine Wirkung in der Politikberatung erreichen, wenn dessen Aussagen nicht verständlich vermittelt werden können. Aus diesem Grund ist der Schritt der Ergebnisaufbereitung und der damit verbundenen Komplexitätsreduktion der Erkenntnisse ein wesentlicher Schritt, damit die Modellresultate auch tatsächlich von Entscheidungsträger\*innen genutzt werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen, wer die Adressaten der Erkenntnisse sind. Werden Fachgremien oder Ausschüsse beraten, können detailliertere Modellresultate vorgestellt werden als bei der Beratung von Entscheidungsträger\*innen mit sehr begrenzter zeitlicher Ressource für die Thematik. Auch variieren bei Entscheidungsträger\*innen der Glaube an Modelle und das Verständnis davon, was die Modelle liefern können und wo ihre Grenzen liegen. Dieser Prozess der Vermittlung der Modellerkenntnisse ist so zentral, dass sich das MT und evtl. der AG über mögliche Formate, z. B. Rich Pictures, Szenarien oder Policy Briefs (Voinov et al., 2018b) ausführlich Gedanken machen sollten. Zwei Konzepte, die derzeit im wissenschaftlichen und angewandten Diskurs zur Ergebnisaufbereitung oft rezipiert werden, sind Serious Gaming und Digital Twin. Beide eignen sich, über ihre spezifische Visualisierung für die verständliche Aufbereitung komplexer Systeme. Serious Games nutzen Elemente aus Spielen (Games), wie Narrative, gemeinschaftlich zu lösenden Herausforderungen, Entdeckungserfahrungen und weitere, um Sinneseindrücke zu evozieren. Ein wesentlicher Bestandteil von Serious Games ist die Implementierung eines bestimmten Wirkungsziels (characterizing goal), womit das Lernen, Verstehen oder der Kompetenzerwerb der Teilnehmer in Bezug auf das Ziel

gefördert wird (Bär et al., 2023). Serious Games nutzen analoge, digitale und vermehrt auch multimediale Methoden (Virtual Reality, Augmented Reality, etc.) um die Teilnehmer\*innen immersiv in das Spiel einzubinden (Checa & Bustillo, 2020). Ein Beispiel für ein Serious Game aus dem Bereich System Dynamics ist En-Roads, in welchem durch Schieberegler die Wirkung von Treibhausgasquellen auf die zukünftige Intensität des Klimawandels spielerisch veranschaulicht werden kann (EN-ROADS, 2023). Digital Twins sind virtuelle Repräsentationen eines physischen Systems auf Basis von 3D-Geodaten. Im Gegensatz zu klassischen statischen 3D-Modellen werden Digital Twins durch neue Informationen aus dem Austausch mit der dazugehörigen virtuellen Umgebung aktualisiert und entsprechend dynamisch verändert (z. B. Verkehr, Industrieproduktion, etc.) (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Damit können komplexe Zusammenhänge und Wechselwirkungen dreidimensional visualisiert und interaktiv und kollaborativ vermittelt werden (Schrotter & Hürzeler, 2020). Trotz dieser Visualisierungsbeispiele deutete unsere Recherche nach Politikmodellen in der wissenschaftlichen Literatur darauf hin, dass genau dieser letzte Schritt des Modellierungsprozesses bisher noch ungenügend bis gar nicht thematisiert wird. Es stellt sich jedoch die Frage, was ein gutes Politikmodell erreicht, wenn dessen Erkenntnisse nicht in die Praxis vermittelt werden.

### **3.1.8 Generelle Anmerkungen zum Modellierungsprozess**

Der hier vorgestellte Modellierungsprozess ist eine stark verallgemeinerte Beschreibung, welche die wesentlichen Schritte des Prozesses beinhaltet. Der Aufwand der jeweiligen Schritte ist jedoch je nach Systemmodellierungsmethode sehr unterschiedlich. So eignen sich qualitative Modellierungen als interdisziplinäre Erweiterung der klassischen expertengestützten qualitativen Einschätzung von Politikinstrumenten. Ganz anders ist es bei den dynamischen Simulationsmodellen ABM und SD, welche die Wirkung eines Politikinstrumentes zeitlich aufgelöst für die zukünftige Entwicklung untersuchen können und damit deutlich tiefer analysieren können als qualitative Ansätze. Dem steht jedoch ein deutlich höherer Mehraufwand gegenüber, sodass diese zeitlich aufwendigen Modellierungsmethoden eher zur Analyse von fundamentalen Problemen und Wirkung möglicher Politikinstrumente genutzt werden können als im Politikberatungsalltag. Voinov (2018) hat diese Abhängigkeit und vor allem auch das Zusammenspiel von Modellierungsmethoden und die Kombination mit weiteren Methoden auf eine andere Art und Weise visualisiert, die in Abbildung 6 dargestellt ist. Auch er geht von einem Problem aus, das durch Ansätze aus der Politikmodellierung analysiert werden kann. Er beginnt aber bei der Datenbeschaffung und ergänzt qualitative Modelle um semi-quantitative und quantitative Modelle. Er weist zudem darauf hin, dass die meisten Politikmodellierungsvorhaben eine Kombination aus Faktenermittlung, Prozesssteuerung und Modellierung nutzen und immer ein gewisses Maß an Moderation und Prozesssteuerung für eine erfolgreiche Systemmodellierung notwendig ist.

Abbildung 6: Typologie der in der Politikmodellierung verwendeten Methoden mit Beispiel-Workflows nach Voinov (2018)



Quelle: Voinov (2018).

### 3.2 Notwendige Ressourcen für die Erstellung von Systemmodellen

In diesem Abschnitt wird auf die Ressourcen eingegangen, die für Systemmodellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten notwendig sind. Dies sind sowohl zeitliche Ressourcen zur Modellerstellung als auch Expertise, personeller Aufwand und Beschaffung von Daten und Informationen. Eine Einschätzung dieser Ressourcen wird im Folgenden diskutiert. Dabei wird vor allem zwischen qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen unterschieden.

#### 3.2.1 Zeitlicher Aufwand

Der Zeitaufwand zur Erstellung von Politikmodellen variiert sehr stark und ist vor allem von folgenden grundlegenden Faktoren abhängig:

- ▶ der betrachteten Komplexität im Modell und der gewünschten Analysetiefe (Abstraktionsebene) der Wirksamkeitsprüfung des Politikinstrumentes (*sehr stark*),
- ▶ der Wahl der Systemmodellierungsmethode, v. a., ob qualitativ oder quantitativ (*sehr stark*),

- ▶ des Vorhandenseins bzw. der Zugänglichkeit benötigter Daten und Informationen, v. a. auch, ob soziale Variablen betrachtet werden und ob das Modell aggregierte (SD) oder detaillierte (ABM) Daten benötigt (*sehr stark*),
- ▶ der Anzahl und Erfahrung der Beteiligten am Modellierungsprozess, z. B. Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung von Workshops (*stark*),
- ▶ der Expertise des Modellierungsteams (*stark*),
- ▶ des Vorhandenseins bereits bestehender Modellkonzepte, Frameworks und Analysetools (*relativ stark*).

Für eine erfolgreiche Modellierung und Aufwandsabschätzung ist eine qualitativ hochwertige Prozesssteuerung wesentlich, die trotz aller Unwägbarkeiten, die während eines Modellierungsprozesses auftreten, die anstehenden Aufgaben überblickt, deren Aufwand einschätzen kann und die Bearbeitung steuert.

Der Vergleich des Zeitaufwandes zur Erstellung qualitativer und quantitativer Modelle in Tabelle 1 verdeutlicht, dass der Grad an Aufwand bei den verschiedenen Modellierungstechniken sehr stark variiert. Dabei orientiert sich die Einschätzung des Zeitaufwandes nach den in Abbildung 5 dargestellten Modellierungsschritten. Während qualitative Systemmodellierungen, z. B. mittels CLD oder Concept Maps, in allen Schritten einen geringen bis mittleren Aufwand voraussetzen, ist dieser bei quantitativen Systemmodellierungen und v. a. bei dynamischen Simulationen, z. B. mittels der Methoden ABM, SD oder EM, in allen Prozessschritten mittel bis hoch. Der bedeutendste Unterschied liegt in der Parametrisierung. Dieser Schritt ist bei quantitativen Modellen sehr aufwendig und abhängig von der betrachteten Komplexität des Modells und insbesondere von der vorhandenen Datengrundlage. Bei qualitativen Modellen entfällt dieser Schritt hingegen gänzlich. Daher kann die Dauer einer Modellerstellung zur Einschätzung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten stark schwanken. So benötigt eine einfache qualitative Systemmodellierung manchmal nur einige Stunden, wohingegen quantitative Systemmodellierungen, für welche die Daten erst noch erhoben werden müssen, mehrere Jahre in Anspruch nehmen können. Dies führt dazu, dass qualitative Systemmodellierungen einen anderen Anwendungsbereich haben als quantitative. Erstere eignen sich zur schnellen Einschätzung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten unter Berücksichtigung der Komplexität, der Nebeneffekte und zur Abschätzung von Dynamiken. Sie können so den expertengestützten Bewertungsprozess eines aktuell in der Politik diskutierten Instrumentes unterstützen. Quantitative Modelle hingegen eignen sich für solche schnellen Bewertungen nicht. Das gilt vor allem dann, wenn diese eine hohe Komplexität berücksichtigen müssen und die Datengrundlage lückenhaft ist. Diese Modellierungsverfahren eignen sich eher dazu, tiefgreifende, langfristige auftretende Probleme und die Wirkung von Politikinstrumenten darauf zu untersuchen. Sie dienen also eher der sehr tiefen Analyse eines komplexen Problems und der schwer einzuschätzenden Wirkung der Politikinstrumente auf Dynamiken, Verhalten und Nebeneffekte. Solche Modellierungen sind eher für Forschungsprojekte prädestiniert, welche Entscheidungsträger\*innen langfristig beraten.

**Tabelle 1: Einschätzung des Zeitaufwandes für qualitative und quantitative Systemmodellierungen zur Wirksamkeitsanalyse von Politikinstrumenten von gering (einige Tage bis wenige Wochen), mittel (einige Wochen bis Monate) bis hoch (einige Monate bis Jahre). Die Modellierungsschritte entsprechen denen aus Abbildung 5, Schritt 2 ist hier nicht enthalten.**

Modellierungsschritt	Qualitative Systemmodellierung (z. B. CLD, Concept Maps)	Quantitative Systemmodellierung (z. B. ABM, SD, Bayes'sche Netze, EM)
1. Schärfen des Modellierungszieles	Geringer Aufwand, bei beiden Modellierungsverfahren gleichwertig	
3. Erstellung der Modellstrukturen	Geringer Aufwand	Mittlerer Aufwand
4. Parametrisierung quantitativer Modelle	Entfällt	Mittlerer bis hoher Aufwand, v. a. für Datenbeschaffung, besonders bei Modellen mit sozialen Komponenten
5. Validierung & Testen der Modelle	Geringer bis mittlerer Aufwand zur Prüfung der Systemstruktur, abhängig von der Komplexität des Modells	Mittlerer bis hoher Aufwand zur Prüfung des dynamischen Systemverhaltens, abhängig von der Komplexität des Modells
6. Analyse der Wirksamkeit des Politikinstrumentes	Geringer Aufwand da nur qualitative Analyse	Mittlerer Aufwand da genauere quantitative Analyse nötig
7. Präsentation der Modellerkenntnisse	Geringer bis mittlerer Aufwand, abhängig von Komplexität des Modells, bei beiden Modellierungsverfahren gleichwertig bzw. bei quantitativer Systemmodellierung leicht höher	

Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

### 3.2.2 Expertise und personeller Aufwand

Die Expertise und personeller Aufwand, die für die Entwicklung von Modellen erforderlich sind, sind teilweise erheblich und variieren stark je nach gewählter Modellierungsmethode (v. a., ob qualitativ oder quantitativ), vorhandenen Daten u. a. Diese Ressourcen sind in unterschiedlichen Formen verfügbar. Modellentwickler\*innen unterscheiden sich sowohl in der Struktur als auch in der Geheimhaltung. Sie lassen sich grundsätzlich unterteilen in: (1) In-House-Modellierungszentren innerhalb des Bereichs des AG (z. B. der Regierung oder einzelner Ministerien oder Abteilungen); (2) externe Modellierungszentren, die vom AG unterstützt und finanziert werden; (3) (un)abhängige gemeinnützige Organisationen, die Entscheidungsträger\*innen bei der Modellentwicklung unterstützen und vom AG beauftragt werden; und (4) kommerzielle Forschungszentren oder Firmen, die Modelle für den AG entwickeln.

Diese Möglichkeiten und deren Unterschiede sollen durch AG berücksichtigt werden, sodass die hohen Anforderungen an das MT durch den jeweiligen Prozess am besten erfüllt werden können. Die Schritte des Modellierungsprozesses in Abbildung 5 verdeutlichen diese Anforderungen:

- Zur Steuerung des Modellierungsprozesses muss mindestens eine Person im MT einen sehr guten Überblick haben, um die vielseitigen Anforderungen des Modellierungsprozesses zu erfüllen.

- ▶ Für die in Abbildung 5 genannten Modellierungsschritte bedarf es im MT auch sozialer Kompetenzen, v. a., um im ersten Schritt zusammen mit dem AG und anderen Beteiligten das Problem zu schärfen und das Modellierungsziel zu definieren, um externe Expertisen in das Modell einzubinden und um zum Schluss die Modellerkenntnisse in die Beratungspraxis zurückzugeben. Das beinhaltet Kommunikation und Kollaboration zwischen Stakeholdern, AG und MT, für die es eine gemeinsame Sprache braucht, die Missverständnisse vermeidet (Gilbert et al., 2018).
- ▶ Zur Wahl der richtigen Systemmodellierungsmethode(n) sollte das MT einen sehr guten Überblick über Systemmodellierungsansätze haben und keine Modellierungsart bevorzugen (z. B., weil es dort evtl. die beste Expertise vorweisen kann). Diese so banal klingende Anforderung ist in Realität schwierig umzusetzen, da sich Modellentwickler\*innen meist in nur wenigen Modellierungsmethoden große Expertisen erarbeitet haben. Für das Vorweisen der Expertise aller in Kapitel 2 beschriebenen Systemmodellierungsansätze muss das MT aus Modellentwickler\*innen mit unterschiedlicher Expertise zusammengesetzt sein, was ein sehr hoher Anspruch ist. Kollaboratives Arbeiten im MT ist dabei von großer Bedeutung.
- ▶ Mindestens eine Person im MT sollte vertieftes Experten- und Erfahrungswissen zu der gewählten Modellierungsmethode vorweisen können. Sollte dies nur bedingt der Fall sein, muss das MT diese Expertise von extern einbinden.
- ▶ Zur Modellierung komplexer Systeme ist es notwendig, dass sich das MT, wenn nicht intern vorhanden, externe Expertise für den Modellierungsprozess einholt, um interdisziplinäre Aspekte (z. B. ökonomische, ökologische, psychologische) des komplexen Systems in guter Qualität in das Modell einbinden zu können. Dies kann, wie in Abschnitt 3.1.3 genannt, durch partizipative Modellierung oder Expert\*innenbefragungen erfolgen. Diese Prozesse müssen organisiert und moderiert werden und die Erkenntnisse müssen in das Modell einfließen. Auch diese Expertisen müssen im MT vorhanden sein und die nicht zu unterschätzenden personellen Kapazitäten eingeplant werden.
- ▶ Für quantitative Systemmodellierungen ist im MT eine gewisse Affinität und Expertise für quantitative Daten unabdingbar. Dies betrifft jedoch nicht nur rein naturwissenschaftliche Daten, sondern auch Daten der empirischen Sozialforschung (z. B. Fragebögen, Interviews). Dabei geht es um die ausgiebige Recherche vorhandener Daten als auch um die Erhebung von Daten. Dieser zeitintensive Aspekt entfällt bei qualitativen Modellen größtenteils.
- ▶ Vor allem für die Modellierung komplexer Systeme müssen Personen im MT eingebunden sein, die Erfahrung mit diesen Systemen und deren Nichtlinearitäten aufweisen. Dies ist wesentlich, um bei der Modellentwicklung die „richtigen“ Fragen stellen zu können und so vereinfachte Annahmen zu vermeiden (Gilbert et al., 2018).
- ▶ Ethische Aspekte sollten vom MT ebenso berücksichtigt werden. Das umfasst die korrekte Nutzung v. a. sozialer Daten, den Missbrauch der Modelle für vorgefertigte Aussagen des AG oder anderer Beteiligten, die Wahrung einer hohen Modellqualität und vieles mehr.

Generell gilt, je besser das MT die genannten Punkte erfüllt, desto qualitativ hochwertiger werden das Modell und die Erkenntnisse. Zudem ist es für die Modellqualität sehr zuträglich, möglichst viele Beteiligte mit unterschiedlichem Systemwissen in die Modellerstellung zu integrieren.

Es ist offensichtlich, dass diese hohen Anforderungen für die Betrachtung komplexer Systeme bzw. Probleme innerhalb des MT nur schwer von einer Person allein erfüllt werden können. Für

sehr vereinfachte qualitative Systemmodellierungen mag dies durch eine Person möglich sein, sehr bedingt jedoch für quantitative Systemmodellierungen komplexer Systeme. Die Modellentwicklung selbst kann dabei vorrangig durch eine Person umgesetzt werden, allerdings stellt es eine große Herausforderung dar, dass diese Person auch die anderen oben genannten Anforderungen erfüllt und die benötigte interdisziplinäre Expertise aufweist. Wie auch der zeitliche Aufwand, ist die für den Modellierungsprozess benötigte Expertise und der personelle Aufwand für qualitative Modelle deutlich geringer als für quantitative Modelle, v. a., wenn es sich um dynamische Simulationsmodelle komplexer Systeme handelt.

### 3.2.3 Daten- und Informationsbeschaffung

Für alle in Kapitel 2 beschriebenen Methoden der Systemmodellierung werden Daten benötigt, unabhängig davon, ob es sich um qualitative, stark vereinfachte oder dynamische Simulationsmethoden handelt. So werden Daten bereits im ersten Schritt des Modellierungsprozesses benötigt, um das problematischen (System-)Verhaltens zu identifizieren, das durch das zu prüfende Politikinstrument gemindert werden soll (siehe Abschnitt 0).

Für qualitative Systemmodellierungsmethoden, wie zum Beispiel Concept Maps oder CLD, werden qualitative Daten, z. B. für die Erfassung der Systemstruktur und deren Zusammenhänge benötigt. Eventuell werden noch quantitative Daten zur Validierung des Modells und Bestätigung der Modellresultate verwendet. Üblicherweise jedoch beschränken sich die benötigten Daten auf die qualitative Form, die über Literaturrecherche oder Einbindung des Wissens von Expert\*innen, Akteuren oder Stakeholdern generiert werden.

Für semi-quantitative Systemmodellierungsmethoden, wie z. B. Fuzzy Cognitive Mapping, sind zumindest quantitative, wenn auch stark vereinfachte Wichtungen der Einflüsse der verbundenen Variablen nötig. Methoden wie SNA, Szenarientwicklung oder entscheidungsbasierte Modellierung können sowohl quantitative als auch qualitative Modelle erzeugen. Hinsichtlich ihres Aufwandes zur Datenbeschaffung stehen diese zwischen den qualitativen und quantitativen Modellen.

Für quantitative Modelle, wie Bayes'sche Netze, SD, CA oder ABM, hingegen ist der Aufwand der Beschaffung benötigter Daten am größten. Jedoch variiert auch dieser beträchtlich zwischen verschiedenen Modellen, abhängig vom gewählten Modellierungsansatz, des betrachteten Komplexitätsumfangs/der Granularität des Modells, der vorhandenen Datengrundlage und der Einbindung sozialer Daten. Der Aufwand ist dabei auch abhängig von der Art der Variablen:

- a) **Einfach zu ermittelnde Variablen („hard variables“)** stellen dabei die mit geringem Aufwand bestimmbar Einflussgrößen eines Modells dar. Einfach zu ermittelnde Daten können mit vergleichsweise geringem Aufwand aus wissenschaftlicher oder grauer Literatur, Datenbanken oder anderen Informationen entnommen werden. Diese Daten müssen nicht extra erhoben werden, sondern sind in der benötigten Art vorhanden.
- b) **Aufwendig zu ermittelnde Variablen** sind Einflussgrößen im Modell, die nur durch intensive Recherche zu ermitteln sind oder erst mit einem gewissen Aufwand erhoben werden müssen. Hierfür kann auch das Wissen aus Expert\*innen-Einschätzungen genutzt werden, diese weisen immer eine gewisse Unschärfe in ihrer Angabe auf.
- c) **Sehr aufwendig zu ermittelnde Variablen („soft variables“)** stellen soziale Variablen dar. Beispiele sind hier Entscheidungsregeln von Akteuren oder die Wirkung von Einflüssen auf das Akteursverhalten in den Modellen. Die Datengrundlage für diese Variablen liegt für die in dem Modell benötigte Art meist nur unzureichend vor. Um diese Daten zu erheben, ist die

Nutzung von Methoden der empirischen Sozialforschung nötig (z. B. Social Data Analysis, Interviews von Expert\*innen, Fragebögen an Beteiligte), welche mit einem höheren Aufwand verbunden sind und die Modellerstellung deutlich verzögern. Sogenannte soziale Variablen („soft variables“), wie zum Beispiel die individuelle Entscheidung für oder gegen eine Innovation, sind sehr aufwendig zu quantifizieren. Trotz größter Sorgfalt in der Erhebung weist diese Art der Quantifizierung die größte Unschärfe auf.

Da die Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten ganz besonders die Wirkung auf die vom Instrument betroffenen Beteiligten beinhaltet, weisen tiefgehende quantitative Modelle zu einem gewissen Teil soziale Variablen auf. Der Mehraufwand zur Parametrisierung ist daher im Vergleich zu qualitativen Systemmodellierungen erheblich.

Den Quantifizierungsaufwand von Modellen beeinflusst ferner, ob soziale Verhaltensmuster aggregiert (bei SD) oder individuell bzw. detailliert (bei ABM) abgebildet werden. Der Aufwand für ein SD-Modell, z. B. die Wirkung von sozialem Druck auf das Verhalten einer Gesellschaft oder einer Akteursgruppe als mittlere Wirkung abzubilden, ist mit einem geringeren Aufwand verbunden als die Ermittlung von individuell unterschiedlichen Entscheidungsschwellwerten, wie es bei der Verhaltensabbildung in ABM häufig der Fall ist.

### 3.3 Mehrwert und Limitierungen

Um die Wirksamkeit von Politikinstrumenten möglichst ganzheitlich einzuschätzen, ist es notwendig, das komplexe System, in dem sie wirken, zu verstehen und berücksichtigen. Modelle können dies abbilden. Dazu gehört im engeren Sinne auch die Abbildung der Wirksamkeit auf das Akteursverhalten in den Modellierungen. Diese Modellierungen können in der Politikberatung zusätzliche Informationen für Entscheidungsträger\*innen in Bezug auf die Ausdifferenzierung des Politikinstrumentes liefern. Ob diese Form von Politikmodellierung auch wirklich einen Mehrwert liefert oder Limitierungen innerhalb des Modellierungsprozesses zur Nicht-Verwendung des Modells führen, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

#### Mögliche Mehrwerte

- ▶ Im Allgemeinen dienen die genannten Systemmodellierungsansätze dazu, vor Einführung des Politikinstrumentes (Ex-ante) mit dessen Wirkung zu *experimentieren*, das heißt, zu analysieren, wie das Politikinstrument unter gewissen Randbedingungen („was-wäre-wenn“) wirken kann. Somit können durch das Instrument nicht beabsichtigte Nebeneffekte vorab identifiziert und ausgeschlossen bzw. reduziert werden (Gilbert et al., 2018). Dies kann durch konzeptuelle qualitative Systemmodellierungsmethoden schon an wenig ausdifferenzierten Politikinstrumenten geschehen. Um die Wirkung quantitativ, z. B. über Ansätze wie ABM oder SDM, zu analysieren, sollte eine spezifischere Fragestellung der Wirkung analysiert werden. Da die erstellten Modelle je nach Fragestellung, in welcher Detailtiefe die Wirkung des Politikinstrumentes geprüft werden soll, ganz unterschiedliche Erkenntnisse bringen, ist die in Kapitel 3.1.1 aufgeführte Schärfung der Problemstellung als Grundlage des Systemmodellierungsprozesses ganz wesentlich. Wichtig ist dabei, dass mit Modellierungsmethoden ST, SD und ABM immer die Systeme dargestellt werden, die ein problematisches Verhalten zeigen, um dann zu analysieren, wie sich die Politikinstrumente darauf auswirken. Mit qualitativen Modellierungsmethoden wie CLD/ST kann diese Wirkanalyse sehr detailliert auf einen kleinen Teilbereich des Gesamtsystems (mit einer spezifischen Fragestellung der Wirkung des Instrumentes) oder sehr allgemein und konzeptionell (zur Analyse der Gesamtzusammenhänge und weitergefassten Nebenwirkungen) geschehen.

- ▶ Vor allem die Modellierungsmethoden zur Abbildung komplexer Systeme ermöglichen die *Berücksichtigung der komplexen Realität*, in der Politikinstrumente wirken können. Diese Komplexität ist ohne qualitative oder quantitative Systemmodellierungen sehr schwer zu erfassen, da vorherrschende lineare Ursache-Wirkungsbeziehungen meist zu stark vereinfacht sind, um die Wirkung von Politikinstrumenten abzubilden (J. Badham, 2010).
- ▶ Die in Kapitel 2 identifizierten Modellierungsansätze eignen sich dazu, das Verhalten der Akteure als Reaktion auf das Politikinstrument abzubilden – auf ganz unterschiedliche Art und Weise, abhängig vom Modellierungsansatz. Dies ist von erheblicher Bedeutung, denn nur, wenn Akteure ihr Verhalten durch das Instrument in der gewünschten Weise ändern, entfaltet das Politikinstrument seine Wirkung. Dieses Verhalten kann durch Methoden der empirischen Sozialforschung auch ohne Systemmodellierungen erfolgen. Allerdings erlauben die genannten Modellierungsmethoden die Analyse dazu, was eine Änderung des Akteursverhaltens durch ein Politikinstrument für Auswirkungen im komplexen System haben kann, in dem das Politikinstrument die Akteure beeinflusst. Hier sei die Methode ABM genannt, die in der Lage ist, emergentes Verhalten abzubilden, was sich als Folge des Instrumentes ergeben kann.
- ▶ Vor allem Methoden wie Systems Thinking, SD und ABM ermöglichen die *Einbeziehung von Entscheidungsträger\*innen* in den Modellierungsprozess (z. B. Group Model Building). Das bewirkt, dass sich auch das Systemverständnis der Beteiligten selbst deutlich verbessert (Hovmand, 2014). Dies ist vor allem bei *stark interdisziplinären Problemstellungen* (wie Klimawandelschutz oder -anpassung) der Fall, in denen zur Beschreibung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten das komplexe System durch Einbindung unterschiedlicher Wissensbestände notwendig ist. Als Folge kann das *mentale Modell*, das heißt das eigene Systemverständnis, deutlich erweitert, lineare Denkmuster aufgebrochen und die Wirkung von Politikinstrumenten *ganzheitlicher* analysiert werden (Scott, 2018). Solche partizipativen Modellierungsprozesse können auch dazu dienen, stark divergierende Meinungen zur Lösung von komplexen Problemen durch Politikinstrumente in Einklang zu bringen (*Konsensfindung*).

### Mögliche Limitierungen

- ▶ In der Praxis stellen die für die Systemmodellierungen *benötigten Ressourcen* (personeller Aufwand, benötigte Daten, Expertisen) eine bedeutende Limitierung dar. Wie schon erwähnt, sind diese für quantitative Systemmodellierungsansätze, v. a. dynamische Simulationen wie ABM oder SD, deutlich größer als für qualitative Systemmodellierungsansätze wie Systems Thinking. Dies hat auch Auswirkungen auf die *Dauer der Modellerstellung*, die stark abhängig von der Modellierungsmethode und der Analysetiefe der Wirkung des Politikinstrumentes ist und deswegen von Tagen bis hin zu Jahren reichen kann. Vor allem bei der Einführung von Politikinstrumenten als Antwort auf drängende Probleme ist eine tiefe Analyse der Wirkung auf die Systemdynamik in Realität nur schwer umsetzbar.
- ▶ Aufgrund der Komplexität des Systems, das einen Großteil der Modellierungsansätze versucht zu berücksichtigen, können v. a. dynamische Simulationen keine genauen Prognosen über die Zukunft und die Wirkung von Politikinstrumenten geben. Dafür sind zukünftige Einflussfaktoren auf das System zu ungewiss. Sie ermöglichen lediglich eine tiefe Analyse dazu, was Politikinstrumente unter gewissen Randbedingungen im System für Effekte erzielen können („was-wäre-wenn“).
- ▶ Auch wenn durch die genannten Modellierungsansätze die *Änderung des menschlichen Verhaltens* aufgrund von Politikinstrumenten abgebildet werden kann, so ist dies aufgrund der

nur teilweise rationalen Entscheidungsmuster sowie der individuellen Unterschiede in der Entscheidung nur schwer in Modellen zu erfassen. So sind Entscheidungsregeln in ABM trotz größter Sorgfalt schwer quantifizierbar, v. a. wenn man bedenkt, dass sich diese in Zukunft – abhängig von den äußeren Umständen – ändern können. Hinzu kommt, dass nur wenige Politikmodelle das Verhalten von Akteuren umfassend konstruieren (Schrieks et al., 2021).

- ▶ Bei der Abbildung des Verhaltens in quantitativen Modellen kann es bei der Beschaffung der notwendigen Daten ethische Herausforderungen geben wie die *Einhaltung des Datenschutzes* (Süsser et al., 2021). Auch besteht die Gefahr, die Modellerkenntnisse zur *Manipulation des Akteursverhaltens* zu missbrauchen, was durch Analysen umfangreicher digitaler Datensätze im Sinne der Data Science und des Machine Learning stark an Bedeutung gewonnen hat (Bertoni et al., 2022).
- ▶ Eine weitere Herausforderung bezieht sich auf die Nutzung der Modelle. Dies betrifft in erster Linie die Fragestellung, ob das *Modell auch wirklich für die Politikberatung genutzt* wird, was stark von der Aufbereitung (Komplexitätsreduktion für Entscheidungsträger\*innen) der Modellergebnisse abhängt. Zudem können Modelle auch zur *Legitimation von vorgefertigten Entscheidungen* missbraucht werden, da Modelle häufig als rationale Bestätigung gesehen werden (Turnpenny et al., 2008).
- ▶ Alle in Kapitel 2 genannten Modellierungsansätze erzeugen *keine rein rationalen Modelle*. Sowohl die Modellierer\*innen, als auch einbezogene Expert\*innen, Stakeholder und Akteure bringen ihr Wertesystem und ihren (beschränkten) Wissensbestand in das Modell ein. Dies betrifft auch die Auswahl an Daten. So können, wie zuvor erwähnt, Modelle absichtlich durch Auswahl der am Modellierungsprozess Beteiligten zur Unterstützung subjektiver Werte genutzt werden (siehe vorheriger Punkt). Diesem äußerst kritischen Punkt kann durch Modelltransparenz, Zugänglichkeit und die Einbeziehung einer Vielzahl von Beteiligten (mit unterschiedlichen Wertevorstellungen) begegnet werden (Bertoni et al., 2022).

Allen Limitierungen zum Trotz können qualitative und quantitative Systemmodellierungen – gewissenhaft durchgeführt – eine neutralere und rationalere Bewertung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten als rein expertengestützte Einschätzungen erzeugen. Das gilt ganz besonders für sehr komplexe, sektorenübergreifende Problemstellungen, die sich beispielsweise im Umgang mit dem Klimawandel ergeben. Systemmodellierungen können dabei immer nur einen Beitrag zur Bewertung von Politikinstrumenten liefern. Neben den genannten Mehrwerten solcher Modelle müssen dabei genannte Limitierungen im Modellierungsprozess so gut wie möglich berücksichtigt werden. Auf diesem Weg können die Erwartungen mit den tatsächlichen Erkenntnissen und deren praktischer Nutzung austariert und die Kommunikation dementsprechend gesteuert werden.

### **3.4 Mögliche Anwendungsfelder für die Systemmodellierungsmethoden in der Politikberatung**

Aus der Machbarkeitsstudie geht hervor, dass qualitative und quantitative Systemmodellierungen großes und vielfältiges Potenzial für die angewandte Politikberatung haben – und in einigen Fällen auch schon eingesetzt wurden (Schünemann et al., 2023). Die näher untersuchten Modellierungsansätze sind in der Lage, komplexe Systeme abzubilden und eignen sich daher gut, um die Formulierung von Politikinhalten zu interdisziplinären Fragestellungen zu unterstützen. Allerdings unterscheiden sich die Verfahren methodisch und inhaltlich. Im Umkehrschluss heißt das: Nicht jede Methode bewährt sich für alle Zwecke. Dieses Kapitel arbeitet heraus, welche Modellierungsansätze an welchen Stellen der Politikberatung am zielführendsten sind.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass der Terminus Politikberatung zu unscharf ist, um eine abschließende Methodenempfehlung vorzunehmen. Vielmehr werden die größeren Funktionslogiken und Handlungsoptionen von Politikberatung herausgefiltert, die mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Methoden korrespondieren können.

### **Wie funktioniert Politikberatung?**

Politikberatung kann in der gesamten Sphäre des Politikprozesses stattfinden. Entscheidungsträger\*innen der Legislative, Exekutive und Judikative können auf kommunaler, regionaler, länder- und bundesweiter Ebene zu allen Fragen von Strukturen und Institutionen (polity), Verhandlungsprozessen (politics) oder konkreten Maßnahmen (policy)-beraten werden. Diese Akteure sowie deren Behörden und Gremien sind potentielle Nutzer\*innen bzw. Adressaten der Modelle. Die Ergebnisse der Systemmodellierungen könnten ihre Entscheidungsfindungen unterstützen.

Es gibt daher nicht nur *Politikerberatung*, sondern auch *Verwaltungsberatung* und *Publikumsberatung* (Steiner, 2009). Die Europäisierung und zunehmende Einbindung in globale Netzwerke führen wiederum zu Politikberatung, die im europäischen und internationalen Mehrebenensystem angesiedelt ist. Jede Ebene hat dabei unterschiedliche Reichweiten, Ressourcen und Leistungserwartungen, auf welche die Politikberatung reagieren muss.

Das Bild verkompliziert sich weiterhin durch die vielen Ausprägungen, die Politikberatung annehmen kann. Sie kann intern (auch parteiintern) stattfinden oder an externe Partner übergeben werden, sie kann transparent oder unter Ausschluss der Öffentlichkeit ablaufen, sie ist formell, informell, geheim oder „zwischen Tür und Angel“ auch mal privat. Letztendlich aber stellt sie Analysen, Informationen oder Empfehlungen für Entscheidungsträger\*innen zusammen, bereitet politische und administrative Entscheidungen vor, vermittelt, analysiert und optimiert politische Maßnahmenprogramme (Kevenhörster, 2021).

### **Herausforderungen in der Politikberatung**

Bislang findet die Beratung in Deutschland vor allem expertengestützt statt. Dabei versuchen einzelne Fachexperten, ihr – idealerweise neutrales und objektives – wissenschaftlich fundiertes Sachverständnis der Politik als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig kann diese Form der Beratung durch die starke Orientierung auf einzelne Personen und Expertisen zu Subjektivität und Disziplinertreue neigen. Demgegenüber stehen politische Entscheidungsträger\*innen vor dem Dilemma der innerparteilichen Meinungsdurchsetzung und parlamentarischen Koalitionsbildung und müssen sich zusätzlich gegenüber der Wählerbasis erklären (Mayntz, 2009). Aus diesem Grund kommt es häufig zu politischen Entscheidungen, die wichtiges interdisziplinäres Wissen nicht einbeziehen und in ihrer operativen Umsetzung entweder allgemeine unvorteilhafte Auswirkungen oder individuelle Benachteiligungen nach sich ziehen.

Neben diesem Spannungsverhältnis steht die Politik vor weiteren Herausforderungen, die sich aus der steigenden Komplexität und Heterogenität von politischen Prozessen und gesellschaftlichen Anforderungen ergeben (Kevenhörster, 2021). Dazu zählen schnellere beschleunigte Veränderungsprozesse durch Technologieentwicklung (Walz, 2019). Neue soziale Medien können zu mehr Meinungsunterschieden in Bezug auf Evidenz und Fakten, aber auch zu einer größeren Akteursvielfalt und einer stärkeren gesellschaftlichen Heterogenität führen (Renn, 2022). Globale Krisen erfordern neue Ansätze der internationalen Kooperation im Mehrebenensystem zulasten der nationalen Steuerungsfähigkeit (Walz, 2019). Gerade dadurch müssen allerdings Unsicherheiten, Risiken, Optionen und Zukunftsszenarien besser erklärt und Dialog und Partizipationsmöglichkeiten geschaffen werden (Walz, 2019).

Die steigende Komplexität erschwert die Identifizierung und Lösung von politischen Fragestellungen. Für diese Situation braucht die Politikberatung innovative, flexible, anpassungsfähige Verfahren zur Wirksamkeitsbewertung von Politikinstrumenten. Sie muss *sektorenübergreifend* und *interdisziplinär* arbeiten, sollte neutral und transparent agieren und ihre möglichst rationalen Ergebnisse gut kommunizieren können. Das hochgradig komplexe Feld des Umgangs mit dem Klimawandel ist ein fundamentales Beispiel für die Herausforderungen, der sich die Politik und auch die Politikberatung durch eine systemische holistische Herangehensweise stellen müssen.

### **Systemmodellierungsmethoden in der Politikberatung**

Um die Politikberatung angesichts dieser Aufgaben zu unterstützen, können qualitative und quantitative Modellierungsverfahren herangezogen werden. Sie modellieren komplexe, nicht-lineare Systemstrukturen und -beziehungen für ein tieferes Verständnis der Wirkung von Entscheidungen, erlauben interdisziplinäre (sektorenübergreifende) Themenzugänge und eröffnen Partizipationsmöglichkeiten. Auf diese Weise können sie Wissen synthetisieren, besser veranschaulichen und so politischen Entscheidungsfindungen mehr Akzeptanz verleihen. Für die Modellierungstechniken braucht es allerdings auch die in Kapitel 3.2. beschriebenen Ressourcen und Fähigkeiten.

*Qualitative Modelle* bieten zahlreiche Vorteile. Sie erfassen die Systemstruktur und die Zusammenhänge zwischen Faktoren, was ein tiefes Verständnis für komplexe Systeme schafft, ohne auf detaillierte Parameter angewiesen zu sein. Auch können mit ihnen soziale Wirkungen und nicht intendierte Nebenwirkungen der Einbindung von Politikinstrumenten in die Systeme analysiert werden. Sie können die mentalen Modelle der beteiligten Akteure auf partizipative Weise einbeziehen, was das Vertrauen in die Modelle stärkt und Lerneffekte und Konsensfähigkeiten bei den Beteiligten auslöst. Diese Modelle sind interdisziplinär und bieten eine Vielzahl von Perspektiven. Die Visualisierung und Strukturierung erleichtern die Kommunikation und das Verständnis. Zudem können sie mit wenig Zeitaufwand erstellt werden und sind wenig ressourcenintensiv. Insgesamt können qualitative Modelle Expert\*innen dabei unterstützen, die Wirksamkeit von Politikinstrumenten unter Berücksichtigung ihrer Komplexität und möglicher Nebeneffekte einzuschätzen.

*Qualitatives Public Policy Modelling* kann besonders gut für explorative Fragestellungen genutzt werden, die schwer quantitativ zu erfassen sind und bei denen qualitative Aspekte eine Rolle spielen (Fuentes et al., 2019; Kolkman, 2020). Als Beispiele können hier die Sozial- oder Bildungspolitik, aber auch die Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik angeführt werden. Auch sind sie sehr sinnvoll, wenn es um die zügige Erstellung eines Stimmungsbildes geht, deren Erkenntnisse umgehend wieder in den politischen Prozess einfließen müssen. Die direkten Partizipationsmöglichkeiten von Betroffenen können helfen, diese Entscheidungen fairer, rationaler und effizienter zu machen und breiter angenommen zu werden. Aus diesen Gründen und im Hinblick auf die geringe Ressourcenintensität sind qualitative Modelle auch besonders für die kommunale Ebene relevant, wo lokale Politikentscheidungen in mehrdimensionalen Feldern, wie der Stadtplanung oder dem Umweltschutz, getroffen werden. Allerdings können die Vorteile dieser Methoden auch in übergeordneten politischen Verwaltungs- und Entscheidungsebenen oder der internationalen Ebene eine wichtige Stellung einnehmen. In diesen und anderen Politikfeldern kann qualitatives Public Policy Modeling als Ergänzung zur klassischen Politikberatung genutzt werden, um tiefere Einblicke in soziale und komplexe politische Zusammenhänge zu gewinnen. Die Wahl des Modellierungsansatzes hängt dabei von der spezifischen Fragestellung und den verfügbaren Daten ab.

Auch *quantitative*<sup>3</sup> Modelle können die konventionelle Politikberatung aus mehreren Gründen ergänzen. Im Gegensatz zu qualitativen Modellen versuchen sie Wirkungen von Änderungen (z. B. durch Einbindung von Politikinstrumenten) möglichst quantitativ zu beschreiben, sei es durch stochastische Beschreibung oder zeitlich aufgelöste Simulation. Diese Modelle sind vielseitig und können sowohl aggregierte (z. B. SDM) als auch individuelle (z. B. ABM) soziale Interaktionen abbilden. Derartige Modelle eignen sich besonders für tiefgreifende Analysen langfristiger Probleme, deren Komplexität und soziale Einflüsse mit anderen Modellierungsmethoden nicht zu erfassen sind. Für die ex-ante Einschätzung der Wirkung von Politikinstrumenten zeigen sie auf, wie sich Dynamiken und Verhalten ändern und welche nicht intendierten und unberücksichtigten Nebeneffekte auftreten können. Dabei wirken sie jedoch nicht prädiaktiv. Aufgrund benötigter quantitativer Daten ist die Erstellung jedoch sehr ressourcenintensiv, vor allem, wenn soziale Einflüsse im Modell eine bedeutsame Rolle einnehmen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass solche Modellierungsmethoden deutlich höhere Anforderungen an die Expertise des MT stellen und für eine verständliche Erläuterung der Ergebnisse beispielsweise wiederum auf die Visualisierungstechniken von qualitativen Verfahren zurückgreifen müssen.

*Quantitatives Public Policy Modelling* findet in verschiedenen Politikberatungsbereichen Anwendung, insbesondere wenn es darum geht, lange vorbereitete politische Entscheidungen auf Basis von quantitativen Daten und Analysen zu unterstützen. Dazu zählen insbesondere Untersuchungen, die eher langfristige und dynamische Veränderungen fokussieren. Das können makroökonomische Analysen, Reformen in der Arbeitsmarktpolitik, Transformation von Verkehrssystemen oder wiederum die Umweltpolitik sein, welche die Auswirkungen von Umweltschutzmaßnahmen oder Ressourcenmanagement bemessen möchte. In jedem Fall muss die dauerhafte Finanzierung von quantitativen Systemmodellierungen sichergestellt sein. Die Finanzierungsvoraussetzung spricht eher für eine Anwendung auf Länderebene, nationaler oder internationaler Ebene, beispielsweise für umfassende politische Programme und Gesetzesformulierungen. Auf regionaler Ebene könnte quantitative Systemmodellierung dazu beitragen, regionale Unterschiede und Anpassungen in politischen Maßnahmen zu berücksichtigen. In der internationalen Politik könnten globale Fragestellungen wie der Klimawandel und Klimagerechtigkeit adressiert werden. Auch Forschungsinstitute und Hochschulen können quantitative Modellierungsansätze verwenden, um umfassende politische Analysen und Empfehlungen zu erstellen. Die Wahl der politischen Beratungsebene hängt von der jeweiligen politischen Fragestellung, dem Umfang der politischen Maßnahmen und dem verfügbaren Datenmaterial ab. In vielen Fällen können quantitative Modelle auf mehreren Ebenen angewendet werden, um Politikempfehlungen zu unterstützen und fundierte politische Entscheidungen zu treffen. Dagegen kommen die quantitativen Systemmodellierungen, aufgrund ihrer ressourcenintensiven Erstellung für die rein kommunale Politikberatung, kaum infrage. Auch die auf Langfristigkeit angelegten Modellierungsfragen könnten die tatsächlichen (kurzfristigen) Anliegen der kommunalen Ebene verfehlen. Qualitative Systemmodellierungen hingegen eignen sich aufgrund ihres geringen Aufwandes und Mehrwertes zum umfassenderen Verständnis der Wirkung des Politikinstrumentes sehr wohl für kommunale Politikberatung.

### **Umsetzung des Modellierungswissens in der Praxis**

Trotz der genannten Vorteile ergab die Literaturrecherche, dass in Deutschland bisher selten qualitative und noch weniger quantitative Systemmodellierungen in der praktischen Politikberatung angewandt werden (Schünemann et al., 2023). Gründe dafür könnten fehlendes Wissen und Ver-

---

<sup>3</sup> Hier sind auch semi-quantitative und hybride Modellierungen eingeschlossen.

ständnis zu Anwendungsmöglichkeiten dieser recht neuen Methoden sein. Ein weiteres Hemmnis kann darin bestehen, dass diese Methoden auf den ersten Blick keine Komplexitätsreduktion anbieten, sondern explizit diese Vielschichtigkeit in Fokus stellen. Das kann in besonders komplexen Themengebieten, in denen Arbeitsprozesse verschlankt und beschleunigt werden sollen, die Kommunikation erschweren. Hinzu kommt häufig der Wunsch politischer Entscheidungsträger nach greifbaren und verständlichen Lösungen. Auch der Anspruch nach genauen „Vorhersagen“ können Systemmodellierungen nicht erfüllen, da sie keine verbindlichen Zukunftsprognosen liefern, sondern Abschätzungen oder Szenarien eines bestimmten Systems. Die Politikberatung kann stark von Kontextualisierungen und einem besseren systemischen Verständnis profitieren. Für eine erfolgreiche Vermittlung der Modellerkenntnisse im Prozess der Politikberatung kommt es darauf an, dass die Komplexität der Ergebnisse wieder reduziert ohne dass wesentliche Informationen verloren gehen.

Der Faktor Zeit stellt eine weitere Barriere für die Anwendung der Methoden in der Praxis dar. Politische Entscheidungen müssen in der Regel schnell oder sogar unter Zeitdruck getroffen werden. Im Sinne der Politikberatung liegt dagegen die Aufgabe darin, bestimmte komplexe Fragestellungen möglichst detailliert und über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Es bestehen entsprechend Herausforderungen darin, das theoretische Wissen über die jeweiligen Vorteile der Systemmodellierungsmethoden besser verfügbar zu machen, um die Aushandlung von Politikinstrumenten zukünftig durch hochwertige Systembetrachtungen zu ergänzen. Auch die praxisorientierte Forschung könnte einen wertvollen Beitrag leisten, indem sie Systemmodellierungen z.B. in interdisziplinären Kooperationen oder Best-Practice-Beispielen anwendet, die Ergebnisse evaluiert und zur Verfügung stellt.

Des Weiteren zeigt dieses Kapitel, dass Politikberatung sehr sachspezifisch ist und stark von Kontexten, Themen und einzelnen Akteuren abhängt. Daher stellt sich die Frage, auf welcher Entscheidungsebene die Modellinformationen und -resultate in den Policy Cycle integriert werden können, um die Formulierung politischer Inhalte bestmöglich zu unterstützen. Dazu braucht es gemeinhin ein sehr profundes Wissen über formale und reale Entscheidungsprozesse. Diese Sachkenntnis ist schwer zu gewährleisten. Die Wissensgenerierung wurde auf Grundlage der Recherche und des fachlichen Austauschs innerhalb des Teams in fünf einzelne Schritte unterteilt. Eine solche Segmentierung erleichtert das systemische Verständnis und unterstützt die Entscheidungsfindung, wer für welche Schritte Zuarbeit leistet. In jedem Fall ist es von großer Bedeutung alle fünf Schritte zu erfüllen, um die Erkenntnisse über die Vorteile von qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen in der Politikberatung wirklich nutzen zu können.

#### **Fünf Schritte der Wirksamkeitsvoraussetzung in der Politikberatung**

1. Generierung des spezifischen Prozesswissens (politics), anschließend eine Strukturanalyse (polity)
2. Akteursanalyse bzw. Akteursfeldanalyse durchführen
3. Schätzung der Verwertungswahrscheinlichkeit der Modellerkenntnisse
4. Erstellung des qualitativen oder quantitativen Modells für die Politikberatung mit validen Daten (unter Beachtung der in Abschnitt 3.1 formulierten Prozessschritte)
5. Aufbereitung der Modellerkenntnisse für die Akteure

Die Reihenfolge der Voraussetzungen ist entscheidend, um die Modellierungsansätze und ihre Erkenntnisse in der praktischen Politikberatung auch wirksam zu machen. Dazu muss zunächst ein spezifisches *politisches Prozess- und Strukturverständnis* zum Themenfeld und der Modellierungsfrage erzeugt werden. Daraufhin ist es notwendig, eine Akteursanalyse durchzuführen, um diejenigen relevanten und einflussreichen Akteure zu identifizieren, die das Wissen aus dem

Modell nachhaltig weitertragen können. Die Akteursfeldanalyse hilft zusätzlich dabei, die Wechselwirkungen zwischen den Akteuren zu verstehen. Ergänzend aus dem Wissen aus Schritt 1 und 2 sollte eine zusätzliche Bewertung dahingehend durchgeführt werden, ob die Umstände die Umsetzung der zukünftigen Modellergebnisse wirklich garantieren können. Der letzte, sehr wesentliche Schritt ist die Aufbereitung der Modellerkenntnisse, was eine von den in Schritt 2 identifizierten Stakeholdern und Akteuren abhängige Reduktion der Modellkomplexität und Darstellung bedeutet.

Erst auf Grundlage dieser ersten drei Schritte sollten die Modelle qualitätsgesichert und innerhalb der präzise formulierten Systemgrenzen entwickelt werden. Die Güte der Daten und die Validität der Modelle sind schließlich von großer Bedeutung, da sie die Zuverlässigkeit der Modelle beeinflussen. Auch erhöhen valide Daten das Vertrauen in das Modell und seine Ergebnisse. Nur mit verlässlichen Daten und validen Modellen können so fundierte politische Empfehlungen abgeleitet werden.

### **3.5 Anwendbarkeit der Systemmodellierungsmethoden im Kontext des Umweltbundesamts**

Das Umweltbundesamt ist eine Bundesoberbehörde, die im Kontext des Umweltschutzes und des Klimawandels Aufgaben zur nachhaltigen Entwicklung übernimmt und ausführt. Dabei sind sowohl die Themengebiete als auch die fachlichen Herausforderungen komplex. Das vorhandene interdisziplinäre Wissen und die disziplinären Hintergründe der Mitarbeiter\*innen müssen synthetisiert und in den vielfältigen Arbeitsfeldern eingebunden werden. An diesem Punkt können sowohl die zuvor beschriebenen qualitativen als auch die quantitativen Systemmodellierungsmethoden zur Beschreibung der Komplexität und sozialen Wirkung ansetzen. Sie helfen, die vorhandenen Komplexitäten nachzuvollziehen, nicht betrachtete Wirkungen aufzudecken und Wahrnehmungsverzerrungen oder Biases entgegenzuwirken. Jedoch eignen sich auch am UBA nicht alle Modellierungsmethoden gleichermaßen.

Während des Abschlussworkshops „*Modellierung sozialer und komplexer Wirkungen von Politikinstrumenten*“ stießen die Anwendungsmöglichkeiten der Systemmodellierungen am UBA selbst auf großes Interesse. Zu Beginn des Workshops zeichnete sich ab, dass die Methodenkenntnisse und Erfahrungen mit STM, SDM und ABM gering waren. Im Rahmen der Diskussion betrafen die Rückfragen vor allem den Umgang mit qualitativen Daten und den zugrundeliegenden Theorien zur Parametrisierung menschlichen Verhaltens sowie die mögliche Fehleranfälligkeit der Systemmodellierung. Bzgl. der Vorteile, Hemmnisse und Anwendungsmöglichkeiten der vorgestellten qualitativen und quantitativen Methoden kristallisierte sich heraus, dass die Teilnehmenden für die komplexen Systemmodellierungen zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für Anwendungen im Umweltbundesamt sehen.

Qualitative Systemmodellierungen sind niedrighschwellige Verfahren. Die Modellerstellung ist wenig ressourcenintensiv, schnell, interaktiv, partizipativ zu erstellen und gut visualisierbar. Sie können maßgeblich zu einer zügigen und fachübergreifenden Wissensbasis für komplexe Problemstellungen beitragen. Sie eignen sich deswegen besonders gut, um zu Beginn eines Projekts oder Vorhabens fachübergreifendes Wissen explorativ zusammenzuführen und komplexe Zusammenhänge aufzudecken. Über die direkte Einbindung der Teilnehmer\*innen und die diskutierten Lerneffekte kann ein profundes Verständnis aller Beteiligten für verschiedene Perspektiven, nicht-lineare Wirkungen und nicht-intendierte Nebeneffekte geschaffen werden. Die guten Visualisierungsoptionen der qualitativen Methoden sind hierbei von zentraler Bedeutung und erlauben die schnelle Erfassung des unterschiedlichen Wissens in einem Modell. Auf Basis der Wissensgenerierung kann die Prioritätensetzung im weiteren Verlauf der Projekte besser

beurteilt werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das UBA bereits hochwertige Projektmanagementtools, wie das Delphi-Verfahren oder die Multikriterienanalyse, nutzt. Die Vorteile der qualitativen Systemmodellierungsverfahren gegenüber den bisher angewandten Tools liegen aber vor allem darin, dass sie besonders dann einen Mehrwert liefern, wenn Unsicherheiten oder Uneinigkeiten in den Expertenmeinungen vorliegen. In diesen Situationen können sie die Frage nach dem „Warum“ anderer fachlicher Herangehensweisen (Wissensbestände) oder die Identifizierung nicht-linearer Ursache-Wirkungszusammenhänge besonders begünstigen. Schließlich sind die qualitativen Systemmodellierungsmethoden mit ihren partizipativen Ansätzen auch dann besonders dienlich, wenn das Wissen vieler unterschiedlicher Disziplinen oder der Einbezug von Wissenschaft und Praxis zur Bewertung von Politikinstrumenten, Maßnahmen oder weiteren Vorgehen notwendig ist, um deren reale Komplexität zu erfassen und diese nicht zu stark zu vereinfachen. Aufgrund der vielfältigen Vorteile und des geringen Aufwandes sowie der überschaubaren Expertise könnten die qualitativen Methoden als In-House-Expertise eingeführt und vor allem bei inter- und transdisziplinären Projekten oder Zusammenarbeit mit externen Partnerinstitutionen angewendet werden.

Quantitative Systemmodelle zur Beschreibung der Komplexität und sozialer Wirkung sind in ihrer Erstellung sehr viel ressourcenintensiver als qualitative Verfahren, wobei der Aufwand, abhängig von der gewählten Methode und der betrachteten Komplexität, sehr unterschiedlich sein kann. Ihre Modellerstellung dauert länger, braucht mehr Know-how und Personal, kann aber tiefgehende Informationen über mögliche dynamische Entwicklungen aufgrund von Politikinstrumenten oder anderen Einflüssen liefern, wenn die Daten hochwertig und ausreichend zur Verfügung stehen. Für das UBA scheint es sinnvoller zu sein, Expertise zu quantitativen Systemmodellen spezifischer Themen über externe Projektausschreibungen einzuwerben. Da quantitative Systemmodellierungen wesentlich aufwendiger sind als qualitative, ist es realistischer, diese als externe Dienstleistung, z.B. im Rahmen von Forschungsprojekten, zu vergeben. System Dynamics Modellierungen beschreiben dynamische Systemzusammenhänge und bauen oftmals auf qualitativen Modellen (v.a. CLD) auf. Zum Experimentieren könnten System Dynamics Modelle mit graphischer Oberfläche als Serious Games/Tools erstellt werden, die das UBA und Externe dann nutzen könnten, um Auswirkungen von Änderungen in der Systemdynamik zu analysieren. Ähnlich wird die Situation in Bezug auf ABM eingeschätzt. Diese Methoden beziehen sich auf individuelle Daten, deren Erhebung und Quantifizierung merklich aufwendiger ist. Sie benötigen zudem nicht zwangsläufig die Vorarbeit durch qualitative Systemmodellierungen, sondern müssen meistens auf zusätzliche sozialempirische Studien zurückgreifen, um vor allem die sozialen Variablen in hochwertiger Qualität zu beschaffen. Dafür eignet sich dieser Modellierungsansatz zur Beschreibung detaillierter sozialer Interaktionen, z. B. hervorgerufen durch ein Politikinstrument und die sich daraus ergebende emergente Systemdynamik. Bei allen Modellierungsverfahren muss ein besonderer Fokus auf der Ergebnisaufbereitung und der darin enthaltenen Komplexitätsreduktion liegen, damit die Erkenntnisse des Modells auch wirklich in der Praxis verwendet werden.

## 4 Exemplarische Anwendung von Systemmodellierungsmethoden

### 4.1 Ziel des Modellierungstests

Neben der Vorstellung des im vorherigen Kapitel beschriebenen allgemeinen Konzeptes zur Anwendbarkeit von qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen zur Einschätzung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten sowie der Recherche von Modellierungsansätzen (Schünemann et al., 2023) war ein weiteres Ziel des Vorhabens, drei ausgewählte Modellierungsmethoden an einem Beispiel zu testen und vorzustellen. Letztendlich zeigen die exemplarischen Tests auf, für welche Fragestellung oder in welcher Kombination sich welche qualitative und quantitative Modellierungsmethoden am besten zur Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten in Abhängigkeit der spezifischen Fragestellung eignen.

Für die exemplarische Anwendung der Methoden wurden im Vorfeld verschiedene Modellierungsansätze aus den Bereichen „*policy modelling*“ und „*social modelling*“ identifiziert sowie hinsichtlich einer Eignung systematisiert und eingeschätzt (siehe Kapitel 2). Einen detaillierten Überblick über die ermittelten Systemmodellierungs- und Simulationsmethoden bietet ein gesondert publizierter Teilbericht des Projektes (Schünemann et al., 2023).

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden aus den benannten Ansätzen drei Methoden, STM, SDM und ABM für eine eingehendere exemplarische Prüfung ausgewählt. Mit allen drei Verfahren lassen sich komplexe soziale Systeme bzw. Probleme mit unterschiedlichem Fokus analysieren und modellieren. Ebenfalls im Austausch mit dem UBA wurde das Thema „Schwammstadt“ bzw. Regenwasserrückhalt (RWR) als konkretes Handlungsfeld gewählt. Bei der Umsetzung von Schwammstadt-Konzepten handelt sich dabei um eine realitätsnahe, dringende sowie komplexe und sektorenübergreifende Problemstellung. Innerhalb des Themenfeldes „Schwammstadt“ sollte exemplarisch die Lenkungswirkung eines informatorischen, eines ökonomischen und eines regulatorischen Politikinstrumentes geprüft werden. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass es bei den Systemmodellierungen vorwiegend um *soziale* Barrieren der Akzeptanz oder der *Diffusion* von Politikinstrumenten in der Gesellschaft handelt.

In diesem Modellierungstest wird von einer weitgefassten Definition von „Akteure(n)“ ausgegangen, welche sowohl Privatpersonen, Kommunen als auch übergeordnete staatliche Instanzen als potentiell handelnde Subjekte unter den Bedingungen des Klimawandels umfasst. Jedoch können die Akteursbegriffe der unterschiedlichen Modellkonzepte aufgrund des Aggregationslevels variieren, was jedoch jeweils verdeutlicht wird. Auch ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den vorgestellten Modellen eher um unausgereifte Modellkonzepte handelt, denn diese Modelle sind weder ausreichend parametrisiert noch ist ihre Modellstruktur valide genug, um für die untersuchte Fragestellung robuste Aussagen zur Wirksamkeit von Politikinstrumenten zu liefern. Vielmehr geht es um das Aufzeigen, welche Chancen und Limitierungen die jeweiligen Methoden aufweisen und welche Modellierungsmethode Erkenntnisse zur Bewertung von Politikinstrumenten liefern kann.

### 4.2 Auswahl der Systemmodellierungsmethoden für die Testmodelle

Als Vorbereitung für die Modellierungstests wurden die Modellierungsmethoden ausgewählt, das zu modellierende Themenfeld eingegrenzt, die zu prüfenden Politikinstrumente abgestimmt und entsprechende Fachexpert\*innen mit einbezogen.

Die Grundlage für die Auswahl geeigneter Systemmodellierungs- und Simulationsmethoden bot die bereits veröffentlichte strukturierte Literaturrecherche (Schünemann et al., 2023). Einen

systematischen Überblick über die identifizierten Methoden bietet auch Abbildung 4. An dieser Stelle rekurriert die Kurzbeschreibung erneut kurz auf die Eigenschaften der Methoden. Anschließend werden die Gründe für die selektierten Methoden dargelegt.

#### Kurzbeschreibung zu Eigenschaften und Unterschiede der Systemmodellierungsmethoden

- ▶ **Qualitative Systemmodellierungen** werden gemeinhin auch als Konzeptualisierungsmethoden bezeichnet. Sie versuchen komplexe Systemstrukturen bzw. Prozesse qualitativ zu erfassen und ermöglichen so inter- und transdisziplinäre Zugänge zur möglichst ganzheitlichen Betrachtung von komplexen Problemstellungen. Durch Einbindung der Beteiligten, Expert\*innen und Stakeholder können diese Modelle gemeinsam erstellt werden und gewinnen durch Einbindung des unterschiedlichen Wissens (mentale Modelle) der Teilnehmenden an Qualität und Akzeptanz. Insgesamt bilden sie die Beziehungen der Komponenten eines Systems oder Prozesse ab und erfassen somit die konzeptionelle *Struktur* eines komplexen Systems bzw. Problems. Zudem können sie teilweise als Basis für nachfolgende quantitative Systemmodellierungen dienen.
- ▶ **Quantitative Systemmodellierungsansätze** nutzen Formeln oder Entscheidungsregeln, um die Beziehungen zwischen Systemkomponenten quantitativ zu beschreiben. Im Mittelpunkt steht die *Dynamik* des Systems, also dessen zeitliche Entwicklung. Insgesamt benötigen quantitative Ansätze teilweise schwer zu erhebende Datenmengen, v. a. für soziale Einflussgrößen. Dafür können sie die komplexen Zusammenhänge auf die Dynamik von Zielgrößen verdeutlichen und Kippunkte bzw. im Vergleich zu einfachen linearen Ansätzen unvorhergesehene Nebeneffekte und Dynamiken identifizieren.
- ▶ Eine weitere Unterscheidung bei Systemmodellierungsmethoden betrifft den Detailgrad (x-Achse, siehe Abbildung 4) der Modellierungen. *Bottom-Up*-Ansätze konzentrieren sich dabei häufig auf das Verhalten individueller Beteiligter untereinander. Dagegen beschreibt *Top-Down* die Interaktion zwischen Einflussgrößen auf aggregierter Art und Weise.

Angesichts dieser Überlegungen wurden für die exemplarische Prüfung von Politikinstrumenten drei unterschiedliche Modellierungsmethoden ausgewählt und miteinander verglichen: Systems Thinking (davon CLD) als qualitative Modellierungsmethode sowie SD und ABM als quantitative Ansätze. Alle Methoden erlauben die Integration der drei Dimensionen (regulatorisch, ökonomisch, informatorisch) von Politikinstrumenten. Sie unterscheiden sich aber sowohl in Bezug auf den Grad der Aggregation als auch hinsichtlich der Art der empirischen Erhebung und des Aufwandes zur Modellerstellung. Die qualitative Methode Systems Thinking und der quantitative Ansatz SD bilden die Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf *aggregierter*, das heißt abstrakter und gemittelter Ebene (Top-Down) ab. Die quantitative ABM hingegen legt den Schwerpunkt auf soziale Interaktionsprozesse auf *individueller Ebene* und die sich daraus ergebende (emergente) Systemdynamik (Bottom-Up). Die vielfältigen Ansätze der sozialen Verhaltensmodellierung können in beiden Methoden in unterschiedlicher Art und Detailtiefe implementiert werden, weshalb alle drei Verfahren insbesondere für die Modellierung des Verhaltens von Akteuren auf Politikinstrumente in Betracht kommen.

#### Begründung zur Auswahl von STM (davon CLD)

Systems Thinking gehört zu den qualitativen Modellierungsmethoden und eignet sich, um nicht-lineare, komplexe Probleme und Prozesse mit vergleichsweise geringem Aufwand zu analysieren. Statt einfachen linearen Kausalketten (x führt zu y) werden verschiedene systemische Faktoren über sogenannte „Rückkopplungsschleifen („Feedback Loops“) eingebunden. Besonders mit CLD lassen sich Rückkopplungsstrukturen innerhalb komplexer Systeme aufgliedern

und als Diagramm visualisieren. Aus den Diagrammen sind Aussagen darüber ableitbar, inwiefern sich ein veränderter Faktor auf andere Faktoren im System auswirken kann. Dadurch können „Was-wäre-wenn?“-Szenarien, Synergien und nicht-intendierte Nebeneffekte abgebildet werden. Erstellt werden Kausaldiagramme durch die partizipative Einbindung von Akteuren und durch die Einbeziehung von Literaturrecherchen. Ein entscheidender Vorteil von CLDs ist der Fokus auf identifizierte Rückkopplungsschleifen (Feedback Loops) und deren Verknüpfungen sowie vornehmlich die visuellen Darstellungsmöglichkeiten der Methode. Gerade Letzteres führt bei den Beteiligten oft zu einer gesteigerten Akzeptanz des Modells, da es nachvollziehbar und damit nicht als unverständliche „Black Box“ gedeutet wird (Scott, 2018). Für den Modellierungstest wurde diese Methode ausgewählt, da sie im Vergleich zu den quantitativen Systemmodellierungen deutlich weniger Zeit und Ressourcen benötigt und trotzdem profunde Aussagen über Systemzusammenhänge und nicht-intendierte Wirkungen von Politikinstrumenten aufzeigen kann.

#### **Begründung zur Auswahl von SDM**

System Dynamics wird zu den quantitativen Ansätzen, genauer zu den dynamischen Simulationsansätzen gezählt. Sie basiert auf der Verwendung qualitativer CLD, indem sie versucht, die Verbindungen der qualitativ erhobenen Variablen zu quantifizieren. Damit ist SD ein Modellierungsansatz, der aggregiert und im Top-Down-Ansatz arbeitet. Die Methode simuliert dynamische, nicht-lineare Beeinflussungen von System- und Zielgrößen. So kann ein vertieftes Systemverständnis erlangt werden, das auch komplexe sektorübergreifende Prozesse (z. B. Umwelt, Wirtschaft, Verkehr), nicht-intendierte Nebeneffekte und deren Wirkung auf Politikinstrumente sowie schließlich den zeitlichen Verlauf von Zielgrößen einschließt. Generell gilt auch für die Methode: Je solider die Datengrundlage, desto aussagekräftiger die beobachteten Dynamiken und Resultate. Dies kann jedoch einen großen Aufwand an Ressourcen bedeuten, vor allem dann, wenn soziale Einflussgrößen zu quantifizieren sind.

#### **Begründung zur Auswahl von ABM**

Auch ABM gehört zu den quantitativen Modellierungsansätzen bzw. dynamischen Simulationsansätzen. Aber anders als SD legt ABM den Schwerpunkt auf individuelle Interaktionen und modelliert die daraus entstehende Prozessdynamik aus einer Bottom-Up-Perspektive. Damit kann ABM deutlich tiefgreifender als SD soziale Phänomene wie Entscheidungsfindung, Innovationsdiffusion oder Akteursakzeptanz untersuchen, die auf individuellen Interaktionen beruhen. Somit ergänzt die ABM-Methode SD um einen komplementären Ansatz und wurde auch deswegen als dritte Methode ausgewählt. Die Wirkungen von Politikinstrumenten lassen sich auf diese Weise aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen. Der Aufwand zur Erstellung eines ABM ist üblicherweise noch viel höher als bei SD, da eine große Anzahl an individuellen Entscheidungsregeln erfasst werden muss und dieser Umstand zudem auch deutlich mehr Rechenkapazität benötigt.

### **4.3 Auswahl des zu modellierenden Themenfeldes und Politikinstrumente**

Um die Wirksamkeit von Politikinstrumenten auf die Akzeptanz und Änderung des Akteursverhaltens qualitativ und quantitativ modellieren zu können, musste zu Beginn des Modellierungstests das Themenfeld eingegrenzt und die betroffene Akteurszielgruppe präzisiert werden.

Die Projektausschreibung knüpfte die Auswahl des Themenfeldes an einige Bedingungen. Zunächst sollte es sich um ein besonders relevantes Thema im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) handeln. Ein Konzeptpapier mit vier Themenvorschlägen wurde erstellt, das als Diskussionsgrundlage für eine enge Abstimmung

und Konkretisierung mit dem UBA genutzt wurde. Die Empfehlungen basierten auf den öffentlich einsehbaren Publikationen zum Prozess der DAS. Die Recherche des IÖR ergab, dass insbesondere Handlungsfelder aus dem Cluster „Wasser“, „Infrastrukturen“ und „Raumplanung und Bevölkerungsschutz“ starke sektorübergreifende Bedeutung haben, viele Synergien mit anderen Anpassungszielen der Bundesregierung bilden und somit eine hohe Komplexität aufweisen.

Schlussendlich wurden vier Themenvorschläge mit jeweils drei dazugehörigen Politikinstrumenten sowie die Adressat\*innen (z. B. Kommune & Grundstückseigentümer\*innen) vorgeschlagen. Die Empfehlungen umfassten:

- 1) Hitzebelastung in Gebäuden (Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen)
- 2) Schwammstadt (Fokus Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung des Regenwasserrückhaltes)
- 3) (Intensive) Dachbegrünung (als Teil des Schwammstadtkonzeptes)
- 4) Starkregen/Sturzfluten

Die zentrale Modellierungsfrage betraf in jedem Musteranwendungsfall die Art der Instrumente, welche die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in den Themenfeldern motivieren. Die Akteurszielgruppe wurde auf die Kommune respektive Grundstückseigentümer\*innen eingegrenzt. Alle regulatorischen, ökonomischen und informatorischen Politikinstrumente stellten hypothetische, aber realistische gesetzliche Verpflichtungen, finanzielle Zuschüsse und Aufklärungsarbeit dar.

Aus den vier präsentierten Themen wählte das UBA den Vorschlag „Schwammstadt“ für den Modellierungstest aus und spezifizierte die Problemstellung gemeinsam mit dem IÖR. So wurde der Schwerpunkt auf die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zur Förderung von „Regenwasserrückhalt“ in Quartieren gelegt. Grund hierfür war eine Einigung auf eine angestrebte Komplexitätsreduktion auf ein Kernanliegen, in dem die Dringlichkeit des Themas seitens des UBA in besonderem Maße vorliegt. Hinsichtlich der maßgeblichen Fragestellung einigten sich die Projektpartner auf die Systemmodellierung der Implementationsdynamik von Maßnahmen zum Regenwasserrückhalt in verschiedenen Wohnquartierstypen mit unterschiedlichen Eigentumsstrukturen. Als Akteurszielgruppe konnten die Kommune, die Bewohnenden und Eigentümer\*innen identifiziert werden. Hinsichtlich des rechtlichen Instruments wurde eine Vorgabe zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zur Steigerung des Regenwasserrückhaltes angenommen. Bezüglich des ökonomischen Instruments wurde ein fiktiver finanzieller Zuschuss für die Maßnahmenanpassung und im Hinblick auf das informatorische Instrument umfassende Informationskampagnen (abhängig vom Akteurskreis) festgelegt.

Das Konzept „Schwammstadt“ (*sponge city*) ist im angloamerikanischen Raum und in China bereits etabliert, in Deutschland dagegen nur vereinzelt umgesetzt und wird im APA III explizit als Zukunftsvision aufgezählt (Bundesregierung, 2020). Insgesamt handelt es sich bei dem final abgestimmten Thema um einen Sachverhalt mit hohem Handlungsbedarf im Rahmen der DAS. Zudem könnten die Politikinstrumente in diesem Themenkomplex, beispielsweise in Form von Policy-Mixes, auch bundesweit wirken und deren Lenkungswirkung auf Beteiligte damit für das gesamte Bundesgebiet illustriert werden. Außerdem bildet das Sujet ein komplexes System ab, da die Maßnahmenimplementierung und -umsetzung eine integrale und interdisziplinäre Kooperation bei Planung, kommunaler Verwaltung und Zusammenarbeit im Mehrebenensystem voraussetzt.

## 4.4 Modellierungsprozess der Testmodelle

Zur Erstellung der Modelle wurde der im Kapitel 3 bzw. Abbildung 5 beschriebene allgemeingültige Modellierungsprozess durchlaufen.

### 1. *Schärfen der Problemstellung und des Modellierungszieles:*

Ein erster Schritt ist, nach der Themenauswahl, die Problemstellung zu schärfen. Dabei muss möglichst exakt festgelegt werden, was genau durch die Systemmodellierungsansätze analysiert werden soll. Im Modellierungstest galt es dabei herauszufinden, wie die verschiedenen Politikinstrumente (informativ, ökonomisch, rechtlich) die Motivation und die Akzeptanz der Grundstücks- und Gebäudeeigentümer\*innen eines urbanen Wohnquartiers zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen beeinflussen. Jene Maßnahmensetzungen bedeuten im Anwendungstest eine Realisierung des Schwammstadtkonzeptes im Quartier. Ferner sollten die Methoden potenzielle Nebeneffekte – auch auf die Bewohnenden – aufzeigen. Dieser Prozess der Problemstellungsschärfung ist fundamental. Damit kann vermieden werden, dass sich die Systemmodellierung später in der Komplexität „verliert“ und letztlich keine zielführenden Aussagen getroffen werden können.

Die Problemschärfung ist auch die Voraussetzung für die Identifikation der Beteiligten bzw. Akteursgruppen, die in die Thematik involviert sind und für welche die Wirkungen der Politikinstrumente analysiert werden sollen. Im Falle des exemplarischen Tests waren dies die Kommunen, Gebäude- bzw. Grundstückseigentümer\*innen und die Bewohnenden des Quartiers.

### 2. *Auswahl der Systemmodellierungsmethode(n):*

Dieser Schritt wurde schon beschrieben. Es wurden CLD, SD und ABM für den Modellierungstest gewählt.

### 3. *Erstellung der Modellstrukturen*

Der dritte Schritt besteht in einer umfassenden Analyse der wichtigsten Einflussgrößen zur Beschreibung der Modellstruktur im CLD-Modell, SDM und ABM. Zu diesem Zweck führte das Modellierungsteam eine extensive Literaturrecherche durch. Der Fokus lag dabei auf sozialen Einflussfaktoren, die menschliches Entscheidungsverhalten für oder gegen eine Maßnahmensetzung bzw. Innovationen lenken. Das CLD wurde auf Basis von Recherche wissenschaftlicher und grauer Literatur sowie durch Einbindung externer Fachexpert\*innen erstellt und bildet Wirkungszusammenhänge in dem komplexen System ab. Auch die Modellstruktur des SDM basiert auf diesem qualitativen CLD. Insofern konnte in diesem Prozessschritt die Systems Thinking-Methode getestet und gleichzeitig eine wesentliche Vorarbeit für den SD-Ansatz geleistet werden. Die Struktur des ABM wurde ebenfalls auf Basis von Recherchen wissenschaftlicher und grauer Literaturrecherche erstellt.

### 4. *Parametrisierung quantitativer Modelle:*

Das qualitative CLD-Modell bedarf keiner Parametrisierung. Hingegen ist eine zeitintensive Parametrisierung für die dynamischen ABM und SD-Simulationsmodelle von großer Bedeutung zur Erlangung valider Modellerkenntnisse. Für das SDM beruht dies auf sehr vereinfachten Annahmen, die auf dem Systemwissen der Modellierenden als auch auf Literaturrecherchen basieren. Für ein Politikmodell muss dieser Schritt deutlich ausgeweitet werden, um die Parametrisierung valide umzusetzen. Für die Vielzahl an vorhandenen sozialen Variablen wären bei dem SDM Methoden der empirischen Sozialforschung zu verwenden. Ausschlaggebend sind dabei die Bezüge zwischen den Variablen. Wie schon erwähnt, geht es in dem vorliegenden Modelltest jedoch nur um das Aufzeigen der Funktion solcher Modelle am Beispiel. Der aufwendige Schritt der validen Parametrisierung war nicht im Umfang

dieses Modellierungstestes. Für das ABM wurde in dem Zusammenhang nur die Modellstruktur inklusive Entscheidungsregeln erstellt. Die im Modell vorhandenen Schwellwerte hingegen wurden im Testmodell nicht quantifiziert, da diese einen noch höheren Aufwand bedeuten als die Quantifizierung des SDM.

5. *Validierung & Testen der Modelle:*

Die visuelle Struktur und die identifizierten Feedback Loops des CLD wurden gemeinsam mit Expert\*innen diskutiert und das Modell auf Plausibilität getestet. Dies umfasst jedoch noch keine ausführliche Validierung des Testmodells. Auch für das ABM und SDM wurde dieser Schritt nicht in der für ein valides Politikmodell notwendigen Art und Weise durchgeführt. Der Grund ist derselbe wie im vorherigen Abschnitt genannt: dass es sich bei den Modellen nur um Tests handelt, die die Funktion solcher Modelle am Beispiel aufzeigen sollen.

6. *Analyse der Wirksamkeit des Politikinstrumentes/Policy-Mixes durch Modellszenarien:*

Um die Wirksamkeit zu untersuchen, werden die zu prüfenden Politikinstrumente in die zuvor erstellten Modelle eingebunden. Im hier durchgespielten Anwendungsfall wurden drei verschiedene Instrumente (informativ, ökonomisch, regulatorisch) simultan integriert. Beim CLD beeinflusst diese Implementation die Modellstruktur. Die Auswirkungen sind erfasst und in Abschnitt 4.5.1 vorgestellt und diskutiert. Für das SDM sind die Auswirkungen der Politikinstrumente auf die Systemdynamik in Abschnitt 4.5.2 erläutert. Hierbei muss aber festgehalten werden, dass nur generelle Effekte gezeigt wurden. Genaue Wirkungen der Politikinstrumente sind nur für valide parametrisierte Modelle möglich. Diese Anforderung erfüllt das SD-Testmodell jedoch nicht. Für den ABM-Test wurden eventuelle Wirkungen der Politikinstrumente auf die Modelldynamik nur qualitativ diskutiert, da das Testmodell nicht parametrisiert ist.

7. *Präsentation der Systemmodellerkenntnisse vor politischen Entscheidungsträger\*innen:*

Der letzte Schritt besteht im Aufbereiten der Erkenntnisse aus den Systemmodellierungen für die Entscheidungsträger\*innen. Für die praktische Verwendung der Erkenntnisse aus den Modellierungen in der Politikberatung ist es notwendig, die Komplexität in einfachen Kernaussagen zusammenzufassen. (Wie schon erwähnt, handelt es sich bei diesem Modellierungstests nicht um valide parametrisierte Modelle, daher wurden die Erkenntnisse der Modelle nur dem UBA vorgestellt, um die Chancen und Limitierungen der jeweiligen Systemmodellierungsansätze aufzuzeigen und zu diskutieren.)

## 4.5 Vergleich der Systemmodellierungsansätze an Testmodellen

In diesem Kapitel werden die drei verschiedenen Modellkonzepte zur Prüfung der Wirksamkeit der erwähnten Politikinstrumente (informativ, ökonomisch, rechtlich) vorgestellt und diskutiert. Es wird beispielhaft modelliert, inwiefern sich die Politikinstrumente in den einzelnen Modellen auf die Motivation und die Akzeptanz der Grundstücks- und Gebäudeeigentümer\*innen eines urbanen Wohnquartiers zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen des Schwammstadtkonzeptes auswirken. Zur besseren Verständlichkeit wurden die Modelle möglichst einfach gehalten.

Für die exemplarischen Systemmodellierungen wurden mehrere Annahmen formuliert:

- ▶ Es handelt sich um ein Plattenbauwohnquartier im Bestand.
- ▶ Ein Immobilienunternehmen ist Eigentümer aller Gebäude und Grundstücke des Quartiers, an denen die Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden können.
- ▶ Das Quartier wird ausschließlich von Mieter\*innen bewohnt.

#### 4.5.1 Qualitatives, aggregiertes Systemmodell: Systems Thinking (Causal Loop Diagram) Modell

In der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde eine qualitative Systemmodellierung mithilfe des *Causal Loop Diagrams* (CLD) aus dem Bereich Systems Thinking (ST) geprüft. Zu Erstellung des CLD wurden die Einflussgrößen ermittelt, die die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen (AM) im Rahmen des Schwammstadt-konzepts maßgeblich beeinflussen. Die Einflussgrößen bzw. Variablen wurden vorwiegend durch Recherche grauer Literatur gewonnen und im späteren Praxisworkshop (siehe Abschnitt 4.7) verifiziert. Die Verbindung dieser Einflussgrößen im CLD ist das Kernelement der Methode, auf deren Basis nacheinander die verschiedenen Politikinstrumente (informativ, regulatorisch, ökonomisch) eingebunden wurden, um deren Wirkungszusammenhänge zu testen (Abbildung 8-10).

Die Wirkungszusammenhänge der identifizierten 18 Variablen wurden in Abbildung 7 mit Pfeilen verbunden. Diese haben unterschiedliche Polaritäten:

- ▶ „+“ bedeutet dabei, dass sich Input und Output in gleicher Weise ändern (z. B. je größer das Problembewusstsein des Immobilienunternehmens, desto größer ist dessen Motivation),
- ▶ „-“ heißt, dass sich Input und Output in unterschiedlicher Weise ändern (z. B. je größer die Anpassungskapazität, desto kleiner die Kosten, die Dürre und Starkregenereignisse durch Schäden hervorrufen können).

Diese Polarität ist bei CLD von großer Bedeutung, denn sollte die Summe der Verbindungen in einem Feedback Loop (Rückkopplungsschleife) ungerade<sup>4</sup> sein, ergibt sich ein *ausgleichender Feedback Loop*. Dieser versucht das System in seinem Ausgangszustand zu halten und wirkt stabilisierend. Sollte die Summe aller Polaritäten in einer Rückkopplungsschleife gerade sein, führt dies zu einem *verstärkenden Feedback Loop*. Jener hat das Ziel, das System in einen anderen Zustand zu bewegen, und wirkt daher destabilisierend. Ebenfalls von großer Relevanz ist die Erfassung von Verzögerungen („delays“) im CLD. Diese werden mit einem Doppelstrich auf der Verbindung gekennzeichnet (siehe Abbildung 7). Durch diese Verzögerungen lässt sich eine vereinfachte zeitliche Dimension und damit eine gewisse Dynamik in das CLD einbinden. Es zeigt auf, ob eine Änderung sofort erfolgt oder mit einer Verzögerung von z. B. einigen Jahren. Bei der Gesamtanalyse des CLD lassen sich somit langsame Prozesse von schnelleren unterscheiden. Auch sind Abwandlungen der üblichen Darstellungsform des CLD möglich, in denen wesentliche Verbindungen fett oder farbig hervorgehoben werden und z. B. an Delays gewisse Zeitdauern geschrieben werden.

Das Aufspüren der Feedback Loops in einem System ist in ST<sup>5</sup> äußerst wichtig, denn beide, verstärkend oder ausgleichend, können dazu führen, dass sich das System nicht linear in seiner Dynamik verhält. Im vorliegenden Modellierungsbeispiel wurden fünf ausgleichende und zwei verstärkende Feedback Loops identifiziert. Im Folgenden werden diese beschrieben und mit den Variablen in Abbildung 7 in Verbindung gebracht:

- ▶ **„Betroffenheit“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je größer die „Betroffenheit durch Extremereignisse“ im Quartier, desto höher die „Motivation zur Umsetzung von AM“ des Immobilienunternehmers und durch Umsetzung von AM somit auch die „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“ gegenüber Starkregen und Dürre. In der Konsequenz

---

<sup>4</sup> Ungerade bedeutet, dass in der Summe ein „-“ übrig bleibt, wenn man alle Polaritäten eines Feedback Loops zusammennimmt. Dabei sind zwei „-“ ein „+“. Gerade bedeutet, dass in der Summe kein „-“ übrig bleibt.

<sup>5</sup> Wie oben bereits erwähnt ist CLD auch ein Teil einer System Dynamics Modellierung. Daher sind die Ausführungen auch für eine SDM relevant.

sinken die verursachten „Kosten durch Extremereignisse“ und damit wiederum auch die „Betroffenheit durch Extremereignisse“. Kurzum, je mehr AM umgesetzt werden und je robuster das Quartier wird, desto geringer ist die Betroffenheit und somit die Motivation des Immobilienunternehmens, weitere AM umzusetzen.

- ▶ **„Wirtschaftlichkeit“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je wirtschaftlicher die Umsetzung von AM, desto größer die „Motivation zur Umsetzung von AM“ des Immobilienunternehmers und durch Umsetzung von AM somit auch die „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“ gegenüber Starkregen und Dürre. Dies führt dazu, dass die verursachten „Kosten durch Extremereignisse“ sinken und damit wiederum auch die „Wirtschaftlichkeit“ weitere AM im Quartier zu implementieren.
- ▶ **„Problembewusstsein“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je größer das „Problembewusstsein des Immobilienunternehmens/-investors“, desto größer die „Motivation zur Umsetzung von AM“, was zu einer höheren „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“ gegenüber Starkregen und Dürre führt und somit zur Reduktion der dadurch verursachten „Kosten durch Extremereignisse“. Somit reduziert sich auch die „Betroffenheit durch Extremereignisse“, was wiederum das „Problembewusstsein des Immobilienunternehmens/-investors“ verringert.
- ▶ **„Bewusstsein“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je größer das „Problembewusstsein des Immobilienunternehmens/-investors“, desto größer die „Motivation zur Umsetzung von AM“, was zu einer höheren „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“ gegenüber Starkregen und Dürre führt und somit zur Reduktion der dadurch verursachten „Kosten durch Extremereignisse“. Somit reduziert sich auch die „Betroffenheit durch Extremereignisse“, was wiederum das „Problembewusstsein des Immobilienunternehmens/-investors“ verringert.
- ▶ **„Wissen“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je größer das „Problembewusstsein des Immobilienunternehmens/-investors“, desto größer das „Wissen“, das er sich aneignet. Der weitere Verlauf ist analog zum vorherigen Loop.
- ▶ **„Finanzierbarkeit“ (verstärkender Feedback Loop):** Je höher die „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“ gegenüber Starkregen und Dürre, desto höher der „Grünanteil des Quartiers“, was sich positiv auf die „Attraktivität des Quartiers für Mietende“ auswirkt. Das wiederum führt jedoch dazu, dass die „Mietpreise“ steigen und somit auch die „Finanzierbarkeit (von weiteren) AM“. Folglich kommt es zu einer Steigerung der „Motivation zur Umsetzung von AM“ sowie der „Anpassungskapazität (Robustheit) des Quartiers“, was wiederum den „Grünanteil im Quartier“ erhöht und verbessert.
- ▶ **„Mietkosten ärmere Haushalte (HH)“ (ausgleichender Feedback Loop):** Je höher die „Attraktivität des Quartiers für Mietende“, desto mehr steigen die „Mietpreise“, was mit einer gewissen Verzögerung dazu führt, dass „Mietende mit geringerem HH-Einkommen“ ausziehen (deren Anzahl im Quartier verringert sich). Daraus ergibt sich mehr „Leerstand“ im Quartier, was die „Attraktivität des Quartiers für Mietende“ sinken lässt.
- ▶ **„Attraktivität reichere Haushalte (HH)“ (verstärkender Feedback Loop):** Je höher die „Attraktivität des Quartiers für Mietende“, desto mehr Zuzug durch „Mietende mit höherem HH-Einkommen“ (deren Anzahl im Quartier erhöht sich). Dieser Umstand bewirkt weniger „Leerstand“ im Quartier und eine entsprechend gesteigerte „Attraktivität des Quartiers für Mietende“.

Die letzten beiden Feedback Loops beschreiben den Prozess der *grünen Gentrifizierung* („*Green Gentrification*“) (Anguelovski et al., 2022; Quinton et al., 2022). Das bedeutet, dass Quartiere mit einem hohen Grünanteil attraktiver erscheinen. Folglich können Mietpreise erhöht werden, da die Mieter\*innen bereit sind, diese zu bezahlen. Jedoch werden finanziell benachteiligte Mieter\*innen so aus dem Quartier verdrängt.

### **Kernaussagen des Modells**

Zusammengefasst zeigt das stark aggregierte Modell, dass die vorhandene Anpassungskapazität (Robustheit) sowie die Betroffenheit des Quartiers bezüglich Starkregen- und Dürreereignisse von Relevanz für die Entscheidungsprozesse des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von AM sind.

Werden AM im Quartier implementiert, steigt die Robustheit des Quartiers. Dadurch sinkt aber die Motivation des Immobilienunternehmens, weitere AM durchzuführen. Dieses Phänomen zeigt sich im Modell durch vier ausgleichende Feedback Loops. Wichtige Hinweise sind auch die Verzögerungen im System, die im CLD mittels zweier Striche auf den Verbindungspfeilen gekennzeichnet sind. Das Modell gibt demnach Aufschluss darüber, dass sich Dürreereignisse stark verzögert auf die Betroffenheit auswirken. Ein Beispiel wären hier Bäume, die aufgrund von Trockenstress erst nach mehreren Dürreereignissen absterben. Mit der zeitlichen Verzögerung ist auch die Hoffnung auf weniger extreme Dürreperioden in den Folgejahren verknüpft, weshalb die Reaktionen auf Dürre aufgeschoben werden. Dagegen lösen Starkregenereignisse eine instantane Betroffenheit aus und der Handlungsdruck wächst sprunghaft.

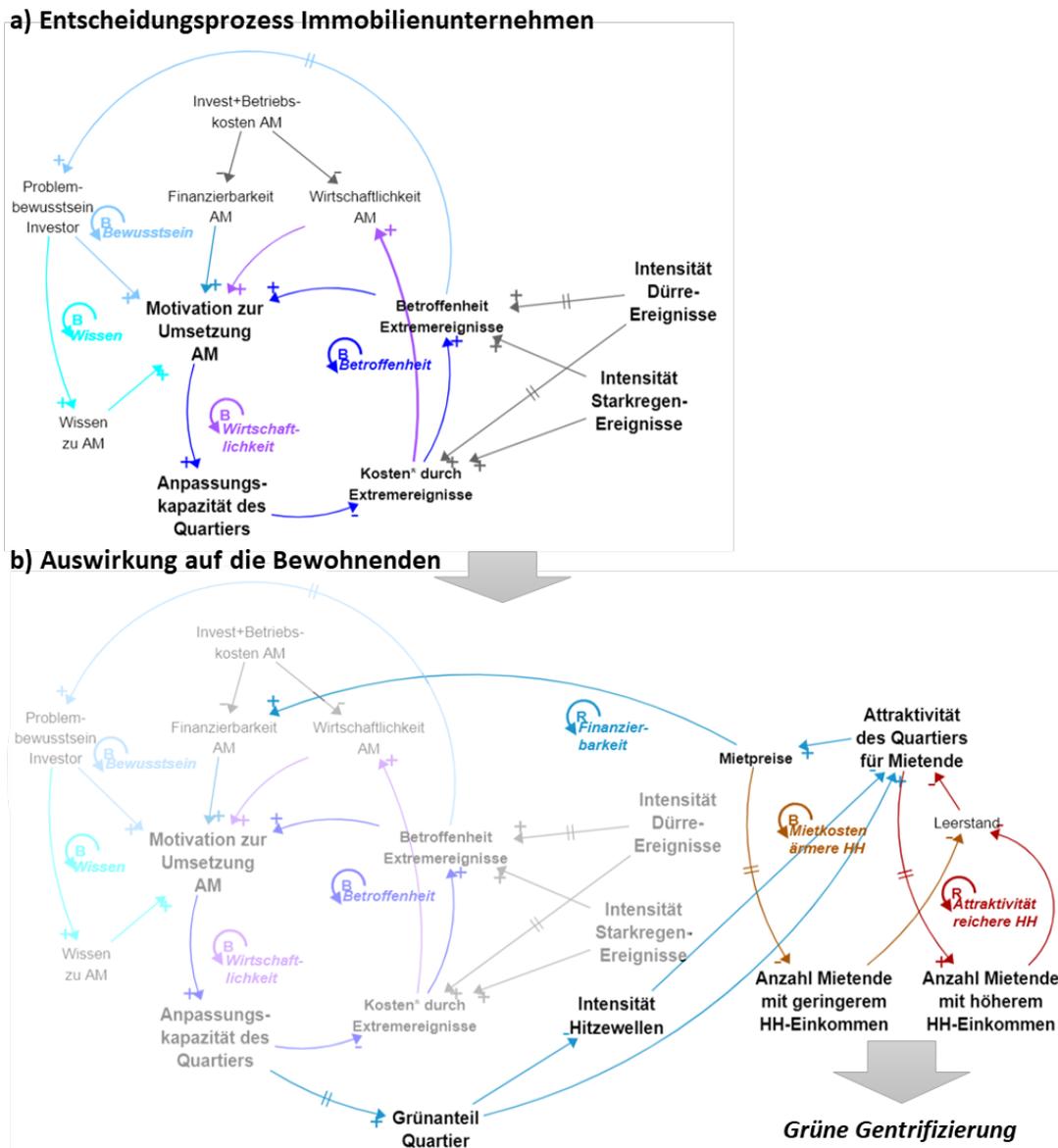
Eine Einflussgröße, die sich auf die Wahrnehmung der Mieter\*innen auswirkt, ist die Attraktivität des Quartiers in Abhängigkeit vom intakten Grünanteil. Durch eine höhere Attraktivität steigen die Mietpreise im Quartier. Einerseits führt das dazu, dass AM für Immobilieninvestoren besser finanzierbar sind (erster verstärkender Feedback Loop). Andererseits verdrängen genau diese höheren Preise Mieter\*innen mit niedrigem Haushaltseinkommen aus dem Quartier. Demgegenüber lockt das Viertel wohlhabender Haushalte, für die die Mietpreise kein Problem darstellen, vermehrt an (zweiter verstärkender Feedback Loop). Diese grüne Gentrifizierung ist ein substanzieller unerwünschter Nebeneffekt, der sich aus der Umsetzung von AM und damit verbundener höherer Robustheit durch intakte Grünanteile entwickelt. Im Umkehrschluss heißt dies, dass Quartiere mit geringerer Anpassungskapazität (Robustheit) gegenüber Dürre- und Starkregenereignissen weniger attraktiv sind und überwiegend von ärmeren Haushalten bewohnt werden.

Unverzichtbar für die Modellierung zur Abbildung komplexer Prozesse ist die Festlegung von Systemgrenzen (*system boundaries*). Das sind Variablen, die im Modell nicht beschrieben werden und daher für die Analyse entfallen (Sternan, 2000). Das betrifft sowohl die Aggregationsebene, das heißt, wie detailliert und tief das System betrachtet wird, als auch den Umfang an Einflussgrößen im System, also was außerhalb der Systembetrachtung liegt und was mitberücksichtigt wird.

Das vorliegende Modell stellt ein sehr stark vereinfachtes, aggregiertes Modell dar, mit dem Ziel, einen leicht verständlichen Anwendungstest für die Nutzung der Systemmodellierungsmethoden abzubilden. Es dient nicht explizit der Politikberatung, sondern soll die Methoden-anwendung verdeutlichen. Je detaillierter die Systemmodellierungen werden, umso tiefer sind die Erkenntnisse aus solchen Modellen. Umso größer wird jedoch auch die im Modell enthaltene Komplexität, die weit über 100 Einflussgrößen und Variablen umfassen kann (Acosta-Michlik & Espaldon, 2008; Gilbert et al., 2018; Schrieks et al., 2021). Das CLD in Abbildung 7 enthält beispielsweise keine auf die Attraktivität ebenso relevanten Einflussgrößen, wie Lage, Wohnungsqualität oder Wohnnebenkosten. Somit entziehen sich aber all die genannten Faktoren der

Analyse, denn sie liegen außerhalb der Systemgrenzen. Wichtig anzumerken ist dabei jedoch, dass der Grünanteil die Attraktivität des Quartiers nur in einem gewissen Maß beeinflusst und andere Einflüsse dominanter sein könnten, hier aber nicht im Fokus der Betrachtungen zur Umsetzung von AM im Quartier gegen Dürre und Starkregen liegen.

**Abbildung 7: Causal Loop Diagram des a) Entscheidungsprozesses des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen (AM) und sich daraus ergebend b) der Auswirkung der Anpassungskapazität des Quartiers auf die Mietenden (HH für Haushalte) und deren Auswirkung auf das Immobilienunternehmen (mit ausgegrautem Teil aus a). B: ausgleichende Rückkopplungsschleifen („Balancing Feedback Loops“), R: verstärkende Rückkopplungsschleifen („Reinforcing Feedback Loops“), Doppelstrich auf einer Verbindung stellt eine starke Verzögerung („delay“) im System dar.**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.



- ▶ **Ausgleichender Feedback Loop:** Eine geringere Anpassungskapazität und damit einhergehend eine begrenzte Attraktivität des Quartiers ruft einen höheren „*Handlungsdruck auf die Kommune zur Förderung von AM*“ hervor. Als Reaktion führt die Kommune das informative Politikinstrument zur Beratung des Immobilienunternehmens ein. Dieses soll die Motivation zur Umsetzung von AM und damit ebenso die Anpassungskapazität und die Attraktivität des Quartiers erhöhen und umgekehrt den Handlungsdruck auf die Kommune selbst senken. Hier ist wichtig zu erwähnen, dass der zweite ausgleichende Feedback Loop aufgrund von Verzögerungen im System (z. B. die Wirkung einer verbesserten Anpassungskapazität auf den Grünanteil des Quartiers) in seiner Dynamik sehr viel langsamer ist als der erste verstärkende Feedback Loop.

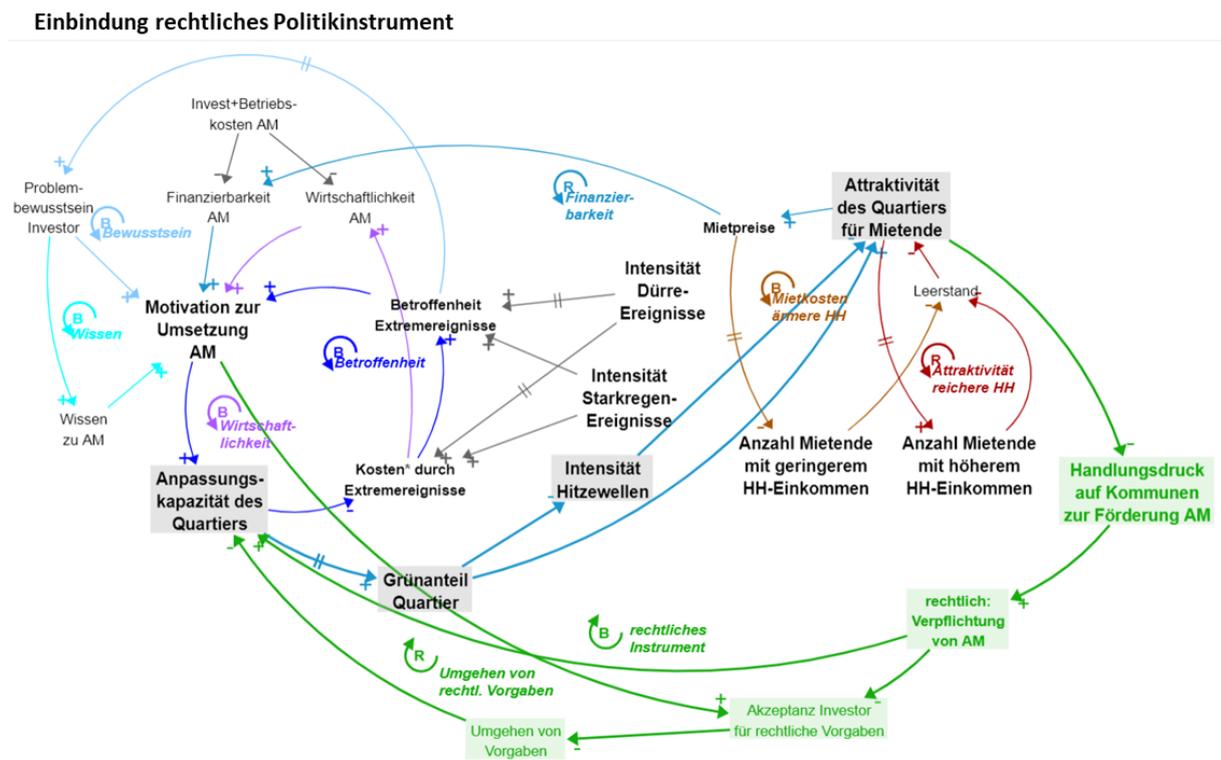
#### **Wirkungsanalyse des regulatorischen Politikinstrumentes**

Im Beispiel wird das regulatorische Instrument als rechtlich bindende Vorgabe zur Umsetzung von AM im Quartier definiert. Auch hier ist das Resultat ein ausgleichender und ein verstärkender Feedback Loop (Abbildung 9).

- ▶ **Ausgleichender Feedback Loop:** Unter der Annahme, dass ein hoher „*Handlungsdruck auf Kommunen zur Förderung von AM*“ lastet, werden die rechtlich bindenden Vorgaben zur Umsetzung von AM durch das Immobilienunternehmen von Seiten der Kommune verstärkt. Durch die vermehrte Implementation von AM wird die Anpassungskapazität und damit der Grünanteil des Quartiers erhöht, unabhängig von der Motivationslage des Unternehmens zur Thematik. Das führt wiederum zur Steigerung der Attraktivität des Quartiers und somit zur Reduktion des Handlungsdrucks auf die Kommune.
- ▶ **Verstärkender Feedback Loop:** Während der ausgleichende Feedback Loop die *erwartete Wirkung* des rechtlichen Instruments aufzeigt, ist die *realistische Umsetzung* von AM tatsächlich von der Motivation des Immobilienunternehmens abhängig. Die Motivation beeinflusst dabei die „*Akzeptanz für rechtliche Vorgaben*“. Für den Fall, dass das Immobilienunternehmen die rechtlichen Vorgaben nur wenig akzeptiert und so versucht, die Richtlinien zu umgehen, ergibt sich ein verstärkender Feedback Loop. Auf diese Weise erhöht sich der „*Handlungsdruck auf Kommunen zur Förderung von AM*“ wieder, weshalb sie die rechtlichen Vorgaben noch mehr verschärfen wird. Die Kommune übt folglich Druck aus, was das Immobilienunternehmen weiter hemmen wird. Es entwickelt sich in der Folge eine „*Abwärtsspirale*“ hinsichtlich der Motivation des Unternehmens, freiwillig zusätzliche, nicht vorgeschriebene AM durchzuführen bzw. die geforderten AM in unzureichender Qualität umzusetzen.

Das CLD in Abbildung 8 (Grundstruktur aus Abbildung 7) zeigt, dass die Wirkung des rechtlichen Politikinstrumentes (grüne Verbindungen) an die Motivation des Unternehmens zur Umsetzung von AM gekoppelt ist. In diesem Beispiel wird angenommen, dass eine rechtliche Verpflichtung zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen im Quartier besteht. Daraus können sich zwei divergierende Dynamiken entwickeln. Das Instrument könnte die Implementierung der AM entweder befördern oder behindern. Deshalb empfiehlt es sich, hier zwei Politikinstrumente zu verknüpfen. Zunächst könnte ein informatorisches Politikinstrument die Akzeptanz für die Umsetzung der AM stärken. Erst danach ist es sinnvoll, das regulatorische Instrument einzuführen. Ein Policy-Mix könnte somit wirksamer sein als ein einzelnes Politikinstrument.

Abbildung 9: Causal Loop Diagram mit Einbindung des rechtlichen Politikinstrument



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

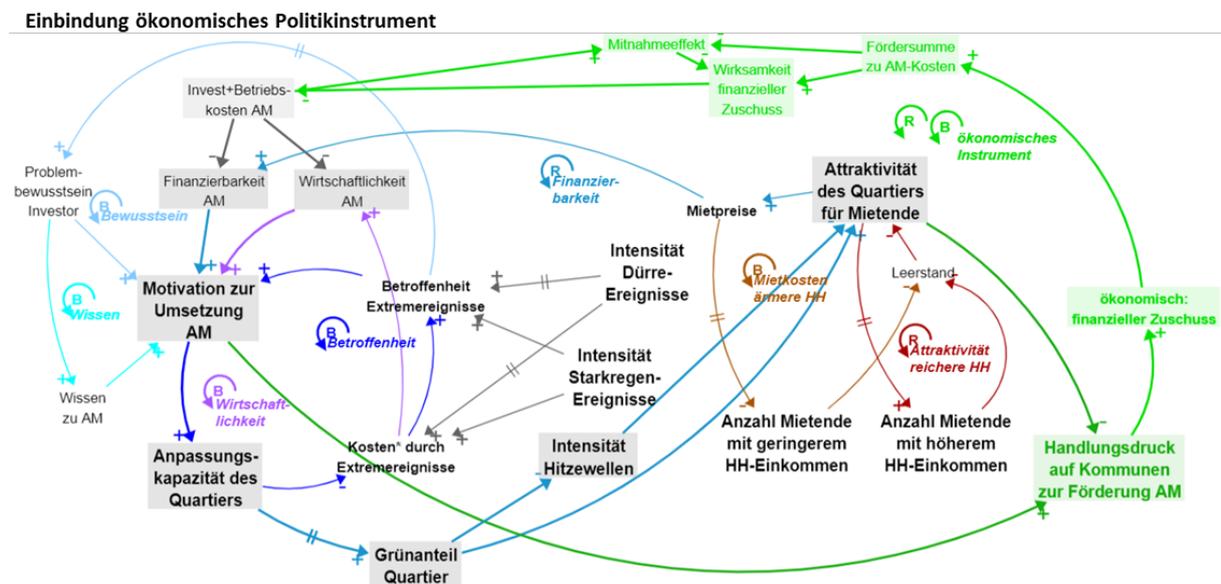
### Wirkungsanalyse des ökonomischen Politikinstrument

Abbildung 10 (Grundstruktur aus Abbildung 7 informiert über die Wirkungen des ökonomischen Politikinstrument. In der exemplarischen Anwendung wurde dafür ein monetärer Zuschuss zur Finanzierung von AM vereinbart. Die Grafik zeigt, dass das ökonomische Instrument zu zwei unterschiedlichen Dynamiken führen kann.

- ▶ **Ausgleichender Feedback Loop der erwarteten Wirkung:** Wenn die Kommune Anpassungsmaßnahmen finanziell bezuschusst, führt das, erstens, zu sinkenden Investitionskosten und regt damit durch bessere Finanzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der AM das Immobilienunternehmen zur Umsetzung von AM an. Zweitens steigen sowohl die Anpassungskapazität als auch die Attraktivität des Quartiers. Dadurch klingt der „Handlungsdruck der Kommune zur Förderung (weiterer) AM“ ab und sie drosselt deshalb die finanziellen Beihilfen oder setzt sie ganz aus. Genau wie am Beispiel des informativen Instruments könnte der ausgleichende Feedback Loop auch zu einem verstärkenden Feedback Loop werden. Das wäre etwa der Fall, wenn das für AM motivierte Immobilienunternehmen direkt Druck auf die Kommune zur Förderung von AM ausübt und sie so zur Einführung von finanziellen Zuschüssen bewegt.
- ▶ **Ausgleichender Feedback Loop zur Beschreibung des Mitnahmeeffektes:** Es ist zu beachten, dass zu niedrige Subventionen von AM zu Mitnahmeeffekten führen können. Das bedeutet, dass das Immobilienunternehmen die Unterstützungszahlungen zwar in Anspruch nimmt, der finanzielle Zuschuss jedoch im Vergleich zu den Investitions- und Betriebskosten so gering ist, dass die Förderung keinen Einfluss auf die Entscheidung des Unternehmens zur Umsetzung von AM hat – es hätte sich also unabhängig von der Förderung sowieso für oder gegen die Umsetzung der AM entschieden. Die finanziellen Zuschüsse sind in diesem Fall

kein zusätzlicher Motivationsanreiz, sondern werden einfach „mitgenommen“. Die kommunalen Steuermittel versickern ohne weitere Effekte im System und hätten auch eingespart werden können. Das Beispiel beschreibt einen bekannten und kritischen Nebeneffekt von ökonomischen Förderinstrumenten (Scharpf, 1983). Dieser lässt sich nur vermeiden, wenn die finanziellen Zuschüsse so hoch sind, dass sie das Verhalten des Unternehmens verändern und dieses etwa zusätzliche AM veranlasst. Die exakte Schwelle, ab wann Verhaltensveränderungen eintreten, kann das qualitative Modell allerdings nicht beantworten und muss durch Methoden der empirischen Sozialforschung (z. B. Befragungen von Immobilienunternehmen) eruiert werden.

**Abbildung 10: Causal Loop Diagram mit Einbindung des ökonomischen Politikinstrument**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

Das CLD beschreibt die Wirkung der verschiedenen Politikinstrumente auf die Systemstruktur und alternierende Systemdynamiken auf *qualitative* Art. Einige Vorteile dieser Systemmodellierungsmethode sind die visuelle Darstellung der Wirkungen, das Aufzeigen der nicht-intendierten Nebeneffekte und das Abschätzen von Änderungen und Verzögerungen im gesamten System. Jedoch bleibt dieser Ansatz qualitativ und erlaubt keine quantitativen Analysen, beispielsweise möglicher zeitlichen Einwicklung in der Zukunft oder auch von modifizierten Zielgrößen (etwa die Attraktivität des Quartiers in der Zukunft), Kippunkten und Verhaltensveränderungen (z. B. aufgrund der Wirkung der Politikinstrumente). Eine quantitative Analyse des betrachteten aggregierten Systems ist nur möglich, wenn das CLD in ein System Dynamics Simulationsmodell überführt wird.

#### 4.5.2 Quantitatives, aggregiertes Systemmodell: System Dynamics Modell

Die ersten Schritte zur Erstellung eines SDM sind der Generierung eines CLD sehr ähnlich. Die Grundstruktur des SDM ist ein „Stock-Flow-Diagramm“ (SFD) (Sterman, 2000). Das heißt, im Vergleich zum CLD ist dies eine Erweiterung der Variablendarstellung, die im CLD alle nur als un spezifizierte Variablen dargestellt sind. Im SFD hingegen ist die Ausdifferenzierung der Variablen, die entweder Bestände (Stocks), Änderungen durch Zu- und Abflüsse (Flows) oder weitere Variablen (Converter) darstellen, von großer Bedeutung. Eine Bestandsvariable (Stock) unterscheidet sich von einer weiteren Variable (Converter) dadurch, dass deren Größe mit der

Zeit abnehmen und zunehmen kann und somit eine gewisse Trägheit des Systems berücksichtigt.

Zur Erstellung des SFD gibt es zwei Wege: Erstens, auf Grundlage eines CLD, zweitens, anstatt des Zwischenschrittes ein qualitatives CLD zu erstellen, wird gleich das SFD konzipiert, und zwar auf Grundlage der zuvor identifizierten Einflussgrößen. Im vorliegenden Beispiel wurde das SDM – auch zum besseren Vergleich – auf Basis des CLD erstellt. In dieser Logik stellt das SDM hier eine quantitative Erweiterung des qualitativen CLD-Modells dar, wobei dies einen deutlichen Mehraufwand in der Modellerstellung mit sich bringt. Neben der Erweiterung zu einem SFD liegt dieser höhere Aufwand vor allem in den zwei darauffolgenden Modellierungsschritten begründet. Dazu werden Formelbezüge (Gleichungen) zwischen allen direkt über Verbindungen (Connectors) verbundenen Variablen, Beständen und Flüssen erstellt. Vor allem die Parametrisierung bzw. Quantifizierung dieser teils schwer erhebbaren Variablen ist sehr aufwendig. Im Zuge der Erstellung der Formelbezüge kommen zudem eine Reihe weiterer benötigter Variablen dazu, wie z. B. Wichtungsfaktoren mehrerer Einflussgrößen auf die Variablen, Schalter oder Regler. So weist das entwickelte SFD in Abbildung 11a die gleiche Grundstruktur auf wie das zugehörige qualitative CLD-Modell, ist jedoch nicht mehr so übersichtlich, da zusätzliche, für die Erstellung des Simulationsmodelles notwendige Parameter hinzugekommen sind. Der Inhalt des SDM unterscheidet sich zudem auch inhaltlich zum qualitativen CLD, denn es wird hier nur die Wirkung von Dürreereignissen auf das Quartier und die dadurch ausgelöste Dynamik dargestellt. Der Grund hierfür ist, dass Starkregen und Dürre in ihrer dynamischen Wirkung ganz unterschiedlich auf das System wirken. Dürren wirken eher langfristig (kumulierend) mit Folgen auf die Reduktion des Grünanteils des Quartiers, Starkregen dagegen eher kurzfristig und intensiv mit Effekt auf Gebäudeschäden im Quartier. Für diesen der Veranschaulichung dienenden Modellierungstest wurde daher nur eines der Extremereignisse (Dürre) betrachtet. Das entwickelte SFD weist sechs Bestände auf, die mit einem roten Quadrat dargestellt sind, sowie die dazugehörigen Flüsse. Diese Bestände sollen an zwei Beispielen aus Abbildung 11a erläutert werden:

- ▶ Der Bestand (Stock) „*Motivation Immobilienunternehmen zur Umsetzung von AM*“ stellt die Motivationslage im Bereich von 0 (unmotiviert) bis 1 (maximal motiviert) des Immobilienunternehmens dar, AM umzusetzen. Wichtig ist, dass es somit eine Eigenschaft von *einzelnen* Akteuren beschreibt und nicht (wie für SDM üblich) eine Akteursgruppe oder größere Menge. Die Zu- und Abnahme des Bestands ist abhängig vom Fluss „*Motivationsänderung*“, der eine Änderungsrate der Motivation darstellt und von vielen Einflussgrößen abhängt, die in die Variable „*Wirkung auf Motivation zur Umsetzung von AM*“ münden. Dies sind neben Problembewusstsein, Betroffenheit von Extremereignissen und Wissen des Unternehmens zu AM die Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit von AM im Quartier. Diese gehen gewichtet auf die Motivationslage ein. Vor allem die Ermittlung dieser Wichtungen ist für vertrauenswürdige SDM von großer Relevanz, da sie zu unterschiedlichen Dynamiken führen. Diese kann z. B. über Befragungsverfahren von den Unternehmen bestimmt werden, z. B., wie groß jeweils die Relevanz der genannten Einflussgrößen auf ihre Motivationslage zur Umsetzung von AM auf einer Skala von 1-10 ist.
- ▶ Der Bestand (Stock) „*Attraktivität des Quartiers für Mietende*“ stellt die Attraktivität des Quartiers für *alle* Mietenden im Quartier dar. Sie ist also im Vergleich zum vorherigen Bestand für das Immobilienunternehmen eine Größe, die die *mittlere* Attraktivitätswahrnehmung aller Mietenden im Quartier darstellt und somit sehr stark aggregiert und keine individuellen Betrachtungen zulässt. Dies stellt eine Vereinfachung dar, die z. B. mit ABM deutlich individueller modelliert und beleuchtet werden kann. Die Bestandsgröße „*Attraktivität des Quartiers für Mietende*“ gilt auch nicht von 0 (minimale Attraktivität) bis 1

(maximale Attraktivität), sondern nur von 0,4 bis 0,8. Der Grund für diese (noch auszu-differenzierende) Annahme ist, dass die Attraktivität eines Quartiers nicht – wie hier in den Systemgrenzen betrachtet – nur vom Leerstand und Grünanteil im Quartier abhängt, sondern auch von anderen, hier nicht betrachteten Einflüssen, wie Lage, Sanierungszustand, Wohnungsgröße etc. Auch die Attraktivität des Quartiers stellt einen sozialen Parameter dar, der durch Befragungen (oder andere Methoden der empirischen Sozialforschung) erhoben werden kann. Hierzu müssten die Mietenden eines Quartiers befragt und daraus der Mittelwert gebildet werden. ABM hingegen kann die Attraktivitätswahrnehmung der Mietenden noch deutlich differenzierter betrachten und die Mietenden in Gruppen ähnlicher Wahrnehmung und Verhaltens einteilen und modellieren, allerdings nur, wenn die Datengrundlage das zulässt. So können im ABM auch soziale Interaktionen der Mietenden berücksichtigt werden, die hier in dem sehr stark abstrahierten SDM nicht betrachtet werden.

Wichtig zu erwähnen ist, dass das SFD zwar die Struktur darstellt, jedoch nicht die elementaren Formelbezüge (Gleichungen), die die Variablen des Modells beschreiben. Somit gibt die anschauliche Struktur des SFD nur einen Teil des SDM wieder. Zum Verständnis des Modells ist daher entweder dessen komplette Offenlegung bzw. mindestens eine saubere Dokumentation mit Beschreibung der Formelbezüge notwendig (J. B. Homer, 2012). Nach der Erstellung aller Formelbezüge im Modell wird deutlich, welche Daten für die Parametrisierung des Modells benötigt werden. In diesem Modell sind das zum Großteil soziale Variablen (soft variables), die nur mit größerem Aufwand durch Methoden der empirischen Sozialforschung behoben und selbst dann mit einer nicht zu behebbenden Unschärfe in das Modell implementiert werden können (mehr dazu siehe Kapitel 4.6). Nach Prüfung der Validität von Einheiten von In- und Outputvariablen als weiterer Plausibilitätstest des Modells wird das parametrisierte SDM im sogenannten Referenzmodus (Reference Mode (J. Homer, 2019)) simuliert. Dies bedeutet, dass die Randbedingungen des SDM so gewählt werden, dass sie die gegenwärtige oder vergangene Dynamik im System wiedergeben sollten. Dies ist ein iterativer Prozess und dient auch dem besseren Verständnis der Dynamik des SDM, die durch die Vielzahl an Variablen schwer zu erfassen ist. Der Prozess der Parameteranpassungen kann beim SDM sehr schnell erfolgen, da die Rechenzeit pro Durchlauf meist deutlich unter einer Minute liegt.

In Abbildung 11b wird die rigide Dynamik dieses Referenzmodus, d. h. keine Dürreereignisse und keine Politikinstrumente des entwickelten SDM über den Simulationszeitraum vom Jahr 2020 bis 2050, wiedergegeben. Aufgrund fehlender Dürreereignisse gibt es keine Notwendigkeit zur Anpassung des Quartiers, entsprechend ist die Motivation des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von AM über den ganzen Zeitraum sehr gering, der Grünanteil sehr hoch und die sich aus Grünanteil und Leerstand ergebende Attraktivität ebenfalls hoch. Im Quartier leben in ca. 10.000 Wohnungen Bewohnende mit höherem Haushaltseinkommen (HHE), das sind etwas mehr als Bewohnende mit niedrigerem HHE (in 8.000 Wohnungen), und der Leerstand ist gering. Die zeitliche Auseinanderentwicklung der Wohnungen mit geringerem und höherem HHE ist eine Frage der Anfangswerte (beide Wohnungen waren auf 9.000 gesetzt) und ergibt aufgrund der enthaltenden Verzögerungen im System erst im Laufe von 15 Jahren einen neuen Gleichgewichtszustand.

Während in Abbildung 11b die Dynamik des SDM für den Referenzmodus (keine Dürreereignisse) dargestellt ist, zeigt Abbildung 11c, welche Dynamik sich ergibt, wenn ab 2020 jedes Jahr moderate Dürre vorherrscht (Intensität Dürreereignis 0,6 (Bereich von 0 für keine Dürre bis 1 für extreme Dürre)). Im Vergleich zum Referenzmodus steigt die Motivation des Immobilienunternehmens durch eine höhere Betroffenheit und bessere Wirtschaftlichkeit möglicher AM gegen die Dürreauswirkungen (absterbende Vegetation) an, verbleibt allerdings auf einem eher niedrigen Niveau, was wiederum dazu führt, dass die Anpassungskapazität des Quartiers bzgl.

Dürren eher gering bleibt. Dadurch sinkt der (intakte) Grünanteil des Quartiers als Auswirkung der Dürren deutlich und mit ihm die Attraktivität des Quartiers. Die geringere Attraktivität sorgt dafür, dass mehr Bewohnende mit höherem HHE wegziehen und mehr mit geringerem HHE durch geringere Mietpreise (aufgrund geringerer Attraktivität) zuziehen. So leben im Jahr 2035 mehr Haushalte mit niedrigerem HHE als mit höherem im Quartier, was ohne Dürreereignisse genau umgekehrt war (Abbildung 11a). Das Quartier verliert also durch die Dürreereignisse aufgrund zu geringer Anpassungskapazität an Grünanteil und somit an Attraktivität, was zu einer Bewohnerschaft im Quartier mit geringeren HHE führt. Auch ohne Einbindung von Politikinstrumenten zeigt das SDM, welche nicht-linearen Dynamiken auftreten durch das komplexe Zusammenspiel der Variablen. So kann für die Beteiligten und Adressaten des SDM schon an dieser Stelle viel über die Zusammenhänge der Parameter im Modell auf Kippunkte oder nicht-intendierte Nebeneffekte gelernt werden.

Während sich das qualitative CLD-Modell bei der Einbindung von Politikinstrumenten auf qualitative Aussagen der Instrumente in ihrer Wirkung auf die Systemstruktur beschränken muss (wo wirkt das Instrument, wie könnte es die Dynamik z. B. in einem Feedback Loop beeinflussen, welche nicht intendierten Effekte kann es auslösen), erlaubt das SDM eine deutlich tiefere Analyse der Wirkung auf die Systemdynamik und somit zeitlichen Verlauf von Kenngrößen. In Abbildung 11 ist das SFD mit Einbindung des informatorischen, rechtlichen und ökonomischen Politikinstrumentes dargestellt, deren Wirkungen zuvor im qualitativen CLD analysiert wurden (siehe Abbildungen CLD: Abbildung 7 bis Abbildung 10). Die Wirkung der einzelnen ab dem Jahr 2030 eingebundenen Politikinstrumente auf die Systemdynamik ist in Abbildung 13 dargestellt.

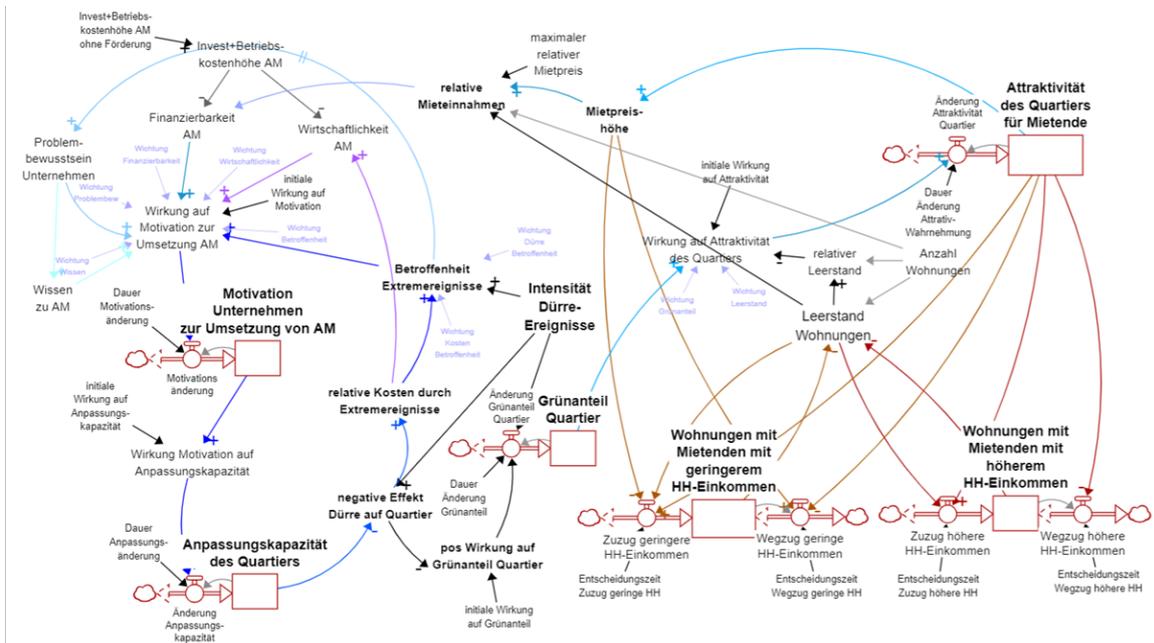
Die Einbindung eines informatorischen Politikinstrumentes, hier die Beratung des Immobilienunternehmens zur Notwendigkeit und Umsetzung von AM, erhöht direkt das Wissen zu AM sowie das Problembewusstsein des Unternehmens und somit die Motivation des Unternehmens, was im zeitlichen Verlauf in Abbildung 13a zu erkennen ist. Durch die damit verbundene erhöhte Umsetzung von AM und der entsprechenden Anpassungskapazität des Quartiers erholt sich ab der Einbindung des informatorischen Politikinstrumentes der Grünanteil des Quartiers. Der sich damit ergebende Anstieg der Attraktivität des Quartiers führt dazu, dass mit zeitlicher Verzögerung wieder mehr Bewohnende mit höherem HHE zuziehen und mit geringerem HHE aufgrund höherer Mietpreise verdrängt werden.

Die Wirkung des ökonomischen Politikinstrumentes (finanzieller Zuschuss zu AM) auf die Systemdynamik ist in Abbildung 13b dargestellt. Dieses wirkt sehr ähnlich zum informatorischen Instrument, allerdings mit den hier definierten Modellannahmen etwas geringer als das informatorische Instrument. Durch das ökonomische Politikinstrument werden die Finanzierbarkeit und die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung von AM verbessert und durch die damit verbesserte Motivation des Unternehmens im Modell mehr AM umgesetzt.

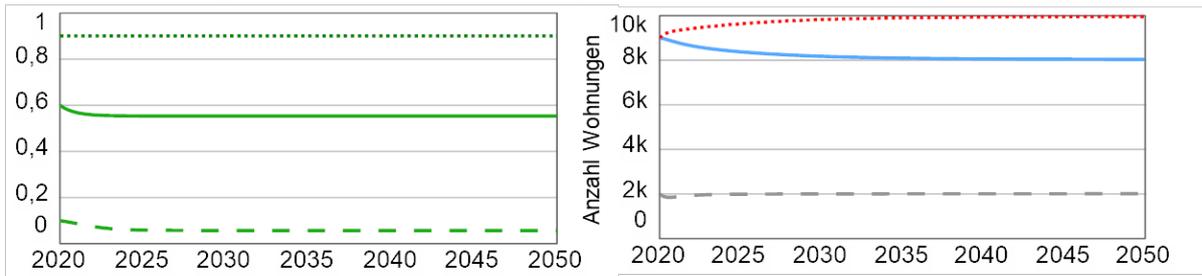
Die Einbindung des *rechtlichen* Politikinstrumentes in Abbildung 13c bewirkt zum einen eine direkte Erhöhung der Anpassungskapazität im Quartier – unabhängig der Motivation des Unternehmens – durch die Pflicht, gewisse AM im Quartier umsetzen zu müssen. Ein gegenläufiger Effekt, den das rechtliche Politikinstrument mit sich bringt, ist die Verringerung der Motivation zur freiwilligen Umsetzung von AM aufgrund des direkten Zwangs, gewisse AM umzusetzen, was bei fehlender Akzeptanz des Unternehmens dazu führen kann, dass keine zusätzlichen AM freiwillig umgesetzt werden und eine optimale Umsetzung der vorgeschriebenen AM eventuell umgangen wird. In dem vorliegenden Modell ist die direkte Wirkung des rechtlichen Instrumentes auf die verstärkte Umsetzung von AM jedoch als deutlich stärker angenommen als dieser genannte Widerstand. Ob dies wirklich so ist, müsste durch Befragungen und Interviews ergründet und in das Modell eingebunden werden.

**Abbildung 11:** a) Stock-Flow-Diagramm des beispielhaften SDM zur Umsetzung von Schwammstadt-Anpassungsmaßnahmen (AM) im Quartier ohne Politikinstrumente, b) Dynamik des Referenzmodus aus dem SDM ohne Dürre und ohne Politikinstrumente, c) Dynamik der Variante mit moderat auftretenden Dürreereignissen ab dem Jahr 2020 und ohne Politikinstrumente. Werte der Motivation, des Grünanteils und der Attraktivität reichen im Modell von 0 (Minimum) bis 1 (Maximum).

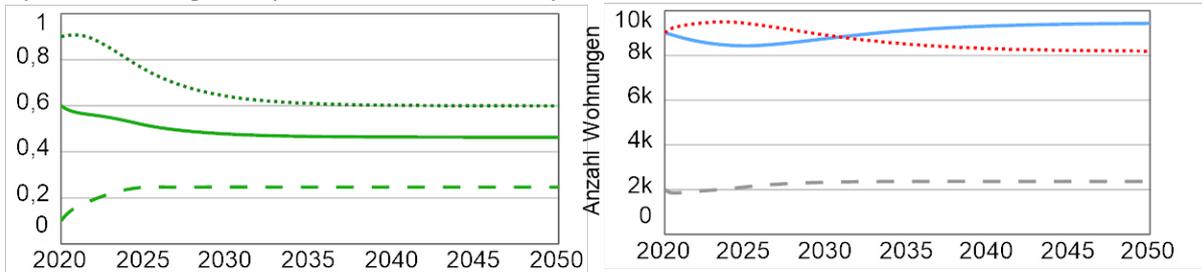
**a) Stock-Flow-Diagramm (ohne Politikinstrumente)**



**b) Ohne Dürreereignisse (ohne Politikinstrumente)**



**c) Mit Dürreereignisse (ohne Politikinstrumente)**

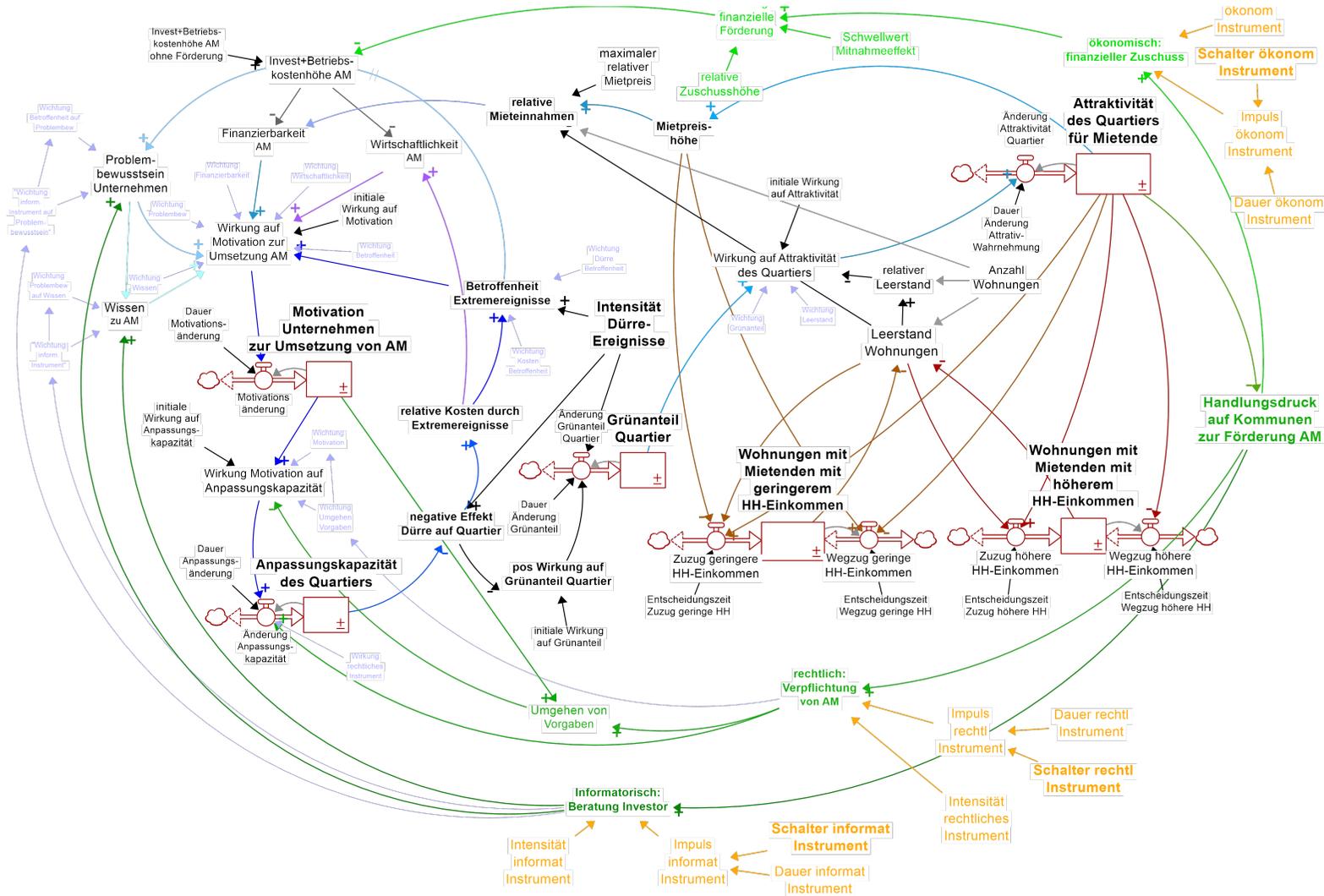


Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

In Abbildung 13d ist die Wirkung eines vereinfachten Policy-Mixes dargestellt, in dem ab dem Jahr 2030 alle drei zuvor genannten Politikinstrumente (rechtlich, ökonomisch und informativ) gleichzeitig wirken. Deutlich ist zu erkennen, dass die Kombination einen deutlichen Anstieg der Motivation des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von AM aufweist und dass obwohl das rechtliche Instrument die Motivation als Nebeneffekt eher senkt. Die durch die Kombination der Politikinstrumente deutlich erhöhte Anpassungskapazität des Quartieres gegenüber Dürre sorgt dafür, dass sich der Grünanteil in den folgenden Jahren erholt und sogar über den Wert des Referenzszenarios ohne Dürreereignisse (siehe Abbildung 13a) ansteigt. Das durchgrünte Quartier führt zu einem deutlichen Anstieg der Attraktivität des Quartiers, ebenfalls leicht höher als im Referenzszenario, und damit jedoch als nicht-intendiertem Effekt auch zu höheren Mietpreisen. An dieser Stelle kann konstatiert werden, dass das Modell Effekte der grünen Gentrifizierung (Anguelovski et al., 2022; Quinton et al., 2022) aufzeigt, da hier Bewohnende mit geringeren Einkommen aufgrund der Förderung von AM durch die Politikinstrumente aus dem Quartier verdrängt werden und wohlhabendere Bewohnende aufgrund der hohen Attraktivität des Quartiers zuziehen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass das entwickelte und hier vorgestellte SDM nicht direkt zur Politikberatung für die Förderung von Schwammstädten genutzt werden kann. Hierfür ist dieses Modell in dem vorgestellten Stand nicht valide genug, da es vor allem in seiner Quantifizierung der Parameter und Verbindungen auf eine Vielzahl von Annahmen beruht. Zudem enthält das Modell eine Vielzahl an Vereinfachungen, die gemacht wurden, damit das Modell als Testbeispiel verständlich bleibt. Dass diese Annahmen durch ausführliche Recherchen plausibilisiert werden müssen, ist von großer Wichtigkeit für aussagekräftige, realitätsnahe Modelle, da in solchen Modellen kleine Änderungen große Auswirkungen auf die Dynamiken haben können. Dies ist auch – aller sorgfältigen Quantifizierung und Validierung zum Trotz – der Grund dafür, dass solche SDM (vor allem mit sozialen Variablen) keine scharfen Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen treffen können (Kokkinos et al., 2018). Diese Modelle dienen eher zur Verdeutlichung, was sich an der Dynamik des Systems ändert, wenn Parameter, wie z. B. Politikinstrumente, variiert werden, und ob nicht beabsichtigte Nebeneffekte auftreten können. SDM haben dabei den Vorteil, dass die Simulationen in meist weniger als einer Minute durchlaufen oder die Wirkung geänderter Variablen in den Simulationstools sogar „live“ betrachtet werden kann. Das ermöglicht ein umfangreiches Experimentieren im System, in dem die Politikinstrumente wirken sollen, und kann somit das Systemverständnis deutlich erhöhen. Andererseits muss festgehalten werden, dass zur Erstellung der Formelbezüge, Quantifizierung und Validierung des Modells sehr viel mehr Zeitressourcen nötig sind als z. B. für qualitative Modelle, wie das zuvor vorgestellte CLD des ST-Ansatzes. Von daher muss immer abgewogen werden, ob der Mehraufwand zur Erstellung valider SDM es rechtfertigt, diese quantitative Modellierungsmethode der qualitativen vorzuziehen. Dies ist vor allem bei solch sozialen Modellen wie dem hier vorgestellten fraglich, denn diese Modelle bleiben aufgrund der Unsicherheit der Quantifizierung der Parameter eher unscharf in ihren Dynamiken. Ob für die Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten eher qualitative oder quantitative Modelle genutzt werden sollten, bleibt individuell in Abhängigkeit der Fragestellung festzulegen.

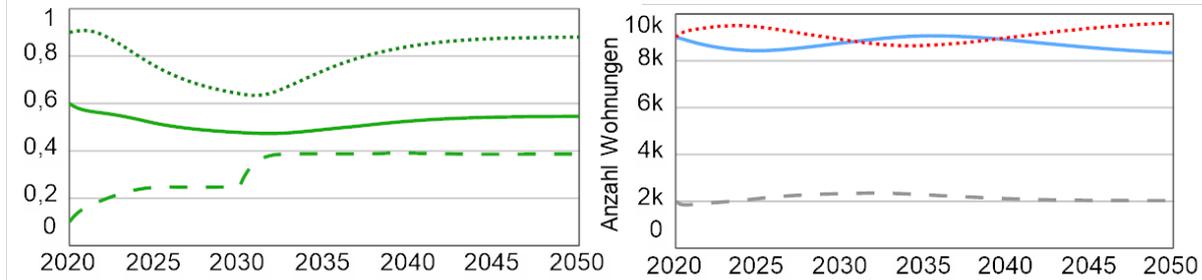
Abbildung 12: Stock-Flow-Diagramm des beispielhaften SDM zu Umsetzungen von Schwammstadt-Anpassungsmaßnahmen (AM) im Quartier mit informatorischem, ökonomischem und rechtlichem Politikinstrument auf Basis des qualitativen CLD Modells in Abbildung 11a.



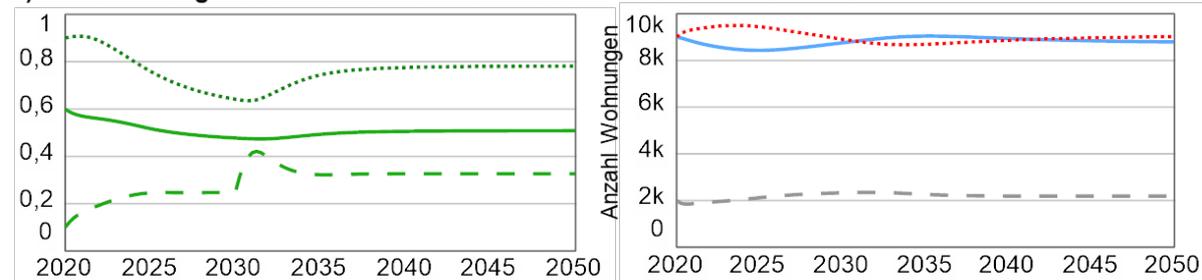
Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

**Abbildung 13: Dynamik des SDM mit moderat auftretender Dürre und Einbindung a) eines informatorischen, b) eines ökonomischen, eines rechtlichen Politikinstrumentes und d) eines Policy-Mixes, implementiert ab dem Jahr 2030 (Vergleich mit Abbildung 11a und b ohne Politikinstrumente). Werte der Motivation, des Grünanteils und der Attraktivität reichen im Modell von 0 (Minimum) bis 1 (Maximum).**

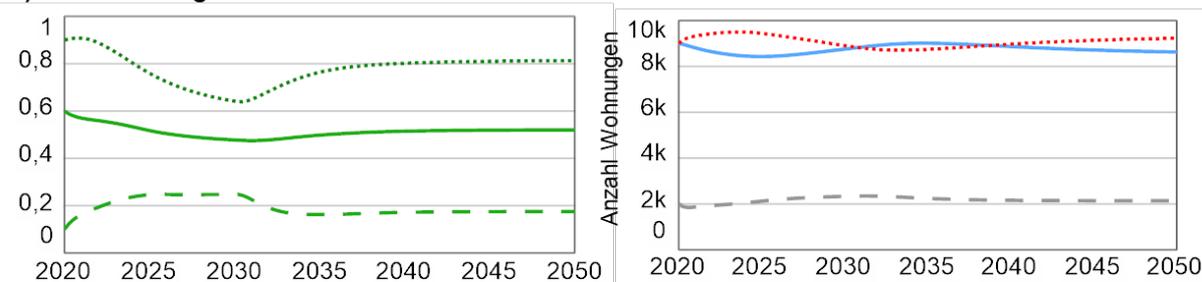
**a) Mit Dürreereignisse und informatorischen Politikinstrument ab Jahr 2030**



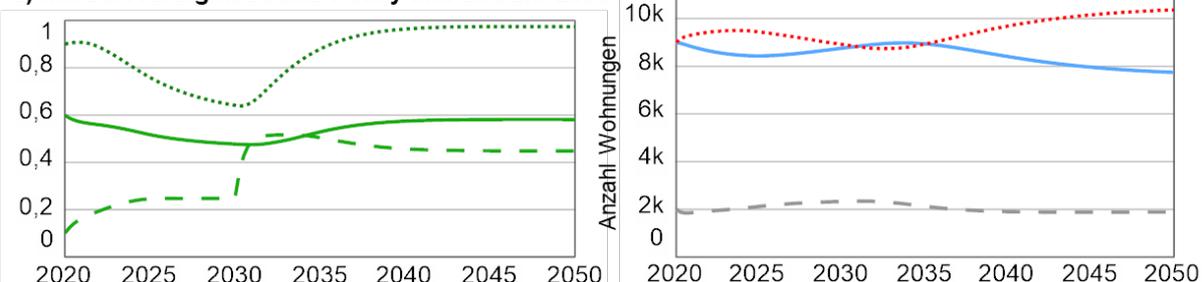
**b) Mit Dürreereignisse und ökonomischen Politikinstrument ab Jahr 2030**



**c) Mit Dürreereignisse und rechtlichem Politikinstrument ab Jahr 2030**



**d) Mit Dürreereignisse und Policy-Mix ab Jahr 2030**



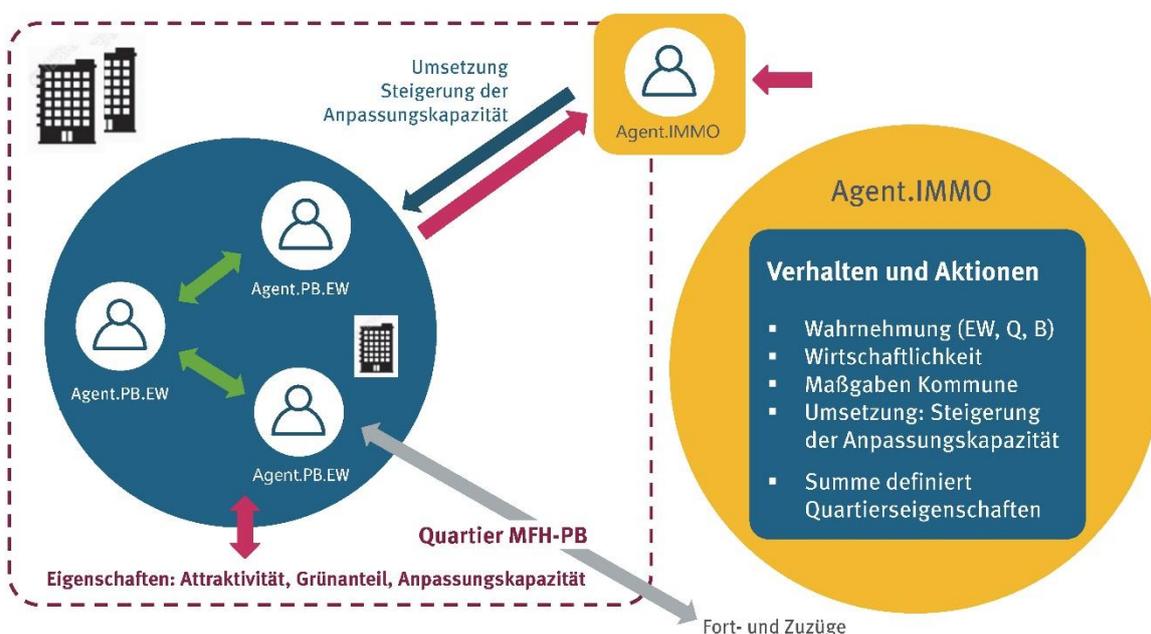
Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

### 4.5.3 Quantitatives, detailliertes Systemmodellkonzept: Agent-Based Modell

Die agentenbasierte Modellierung konzentriert sich methodenbedingt auf die handelnden Subjekte (Akteure), deren Eigenschaften und Verhalten detailliert abgebildet werden. Im vorliegenden, eingangs dieses Kapitels definierten Anwendungsfall sind die zu modellierenden Akteure einerseits das Immobilienunternehmen und andererseits die Bewohnenden des Quartiers sowie die neu hinzuziehenden Mietenden aus anderen Quartieren. Der entscheidende Vorteil dieses sogenannten Bottom-Up-Ansatzes ist, dass hiermit emergente, nicht-lineare und somit a priori nicht vorhersagbare Entwicklungen modelliert werden können. Nachteilig hingegen ist, dass hierfür umfangreiche Informationen über die Eigenschaften, individuelle Motivationen und Interaktionen der handelnden Akteure bekannt sein müssen, um deren Verhaltensmuster so realistisch wie möglich abzubilden.

Im Gegensatz zu den in 4.5.1 und 4.5.2 gezeigten komplexen, jedoch anschaulichen Visualisierungen von CLD und SDM besteht bei ABM grundsätzlich die Herausforderung der geeigneten Darstellungsform, da die entstehende Dynamik erst im Modellverlauf insbesondere durch die Interaktionen der handelnden Individuen entsteht. Daher eignen sich statische Modellabbildungen nur sehr begrenzt. Die Darstellungen wirken im Vergleich zu CLD und SDM deutlich weniger komplex, dennoch können im Zeitverlauf sehr komplexe Entwicklungen und Verhaltensmuster modelliert werden. Häufig wird daher in der Literatur sogar auf Abbildungen verzichtet und stattdessen die Eigenschaften, Interaktionen und Verhaltensoptionen der Akteure (Agenten) tabellarisch beschrieben bzw. die standardisierte, textbasierte Modellbeschreibung ODD (Grimm et al., 2020) verwendet. Im Folgenden wird das ABM-Konzept zunächst als generalisierte Übersicht (Abbildung 14) visualisiert, die die Akteure, ihre Interaktionen, Motivationen und Handlungsoptionen zeigt.

**Abbildung 14: Generalisierte Übersicht des Agent-Based Modellkonzeptes, die die handelnden Akteure (Agent.IMMO entspricht dem Immobilienunternehmen, Agent.PB.EW entspricht den bewohnenden Mietenden), ihre Interaktionen, Motivationen, Handlungsoptionen sowie die Eigenschaften ihres Wohnumfeldes zeigt. EW: Einwohner, Q: Quartier, B: Betroffenheit, MFH: Mehrfamilienhaus, PB: Plattenbau, Immo: Immobilienunternehmen**



Quelle: Eigene Darstellung, IÖR.

Da das Verhalten des Einzelakteurs „Immobilienunternehmen“ bereits umfänglich durch die SDM beschrieben und abgebildet werden kann, konzentriert sich der zweite Teil auf die Beschreibung der Mietenden. Hier kann der Unterschied zur SDM besonders gut verdeutlicht werden, da sich die Modelldynamik vor allem aus der detaillierteren Betrachtung der Interaktionen zwischen den Akteuren, deren Verhaltensänderungen (Zu- und Fortzüge) und der sozialen Durchmischung im Quartier ergibt.

Im Fall der Modellierung des Einzelakteurs „Immobilienunternehmen“ kann die ABM sogar eher als *Discrete Event Simulation* (diskrete Ja-oder-Nein-Entscheidung für oder gegen eine Anpassungsmaßnahme) aufgefasst werden. Hier ist die SDM flexibler, welche fließende Übergänge erlaubt, was insbesondere bei der gemittelten Betrachtung mehrerer Unternehmen sinnvoll ist.

### **ABM-Prozesskonzeptmodell für Mietende im Plattenbauwohnquartier im Bestand**

Im Folgenden werden die konzepthafte Modellierung eines Plattenbauwohnquartiers im Bestand (Modellumgebung) und die bewohnenden Akteure (handelnde Agenten im Modell) innerhalb dieses Quartiers beschrieben. Dazu werden den einzelnen Akteuren (1) Eigenschaften (wie zum Beispiel der soziale Status), (2) Wahrnehmungen (wie zum Beispiel die Attraktivität des Wohnquartiers oder die Betroffenheit durch Extremwetterereignisse), (3) Interaktionsmöglichkeiten (wie zum Beispiel der Austausch untereinander oder Forderungen an das Immobilienunternehmen) sowie (4) Verhaltensoptionen (wie zum Beispiel der Umzug in ein anderes Quartier) zugewiesen.

#### **Eigenschaften (Umgebung)**

In der ABM kommt neben der detaillierten Definition der Agenten auch die Beschreibung und Abgrenzung (Systemgrenze) der Umgebung (Environment) eine entscheidende Bedeutung zu. Dem Quartier werden initial verschiedene Eigenschaften zugewiesen, die den Handlungsrahmen der Agenten (Mietende) bestimmen, zum Beispiel das Mietniveau, der Leerstand im Quartier oder dessen aktuelle Anpassungskapazität gegenüber Extremwetterereignissen. Diese Eigenschaften bestimmen u. a. die Attraktivität des Quartiers für bestimmte Mietergruppen.

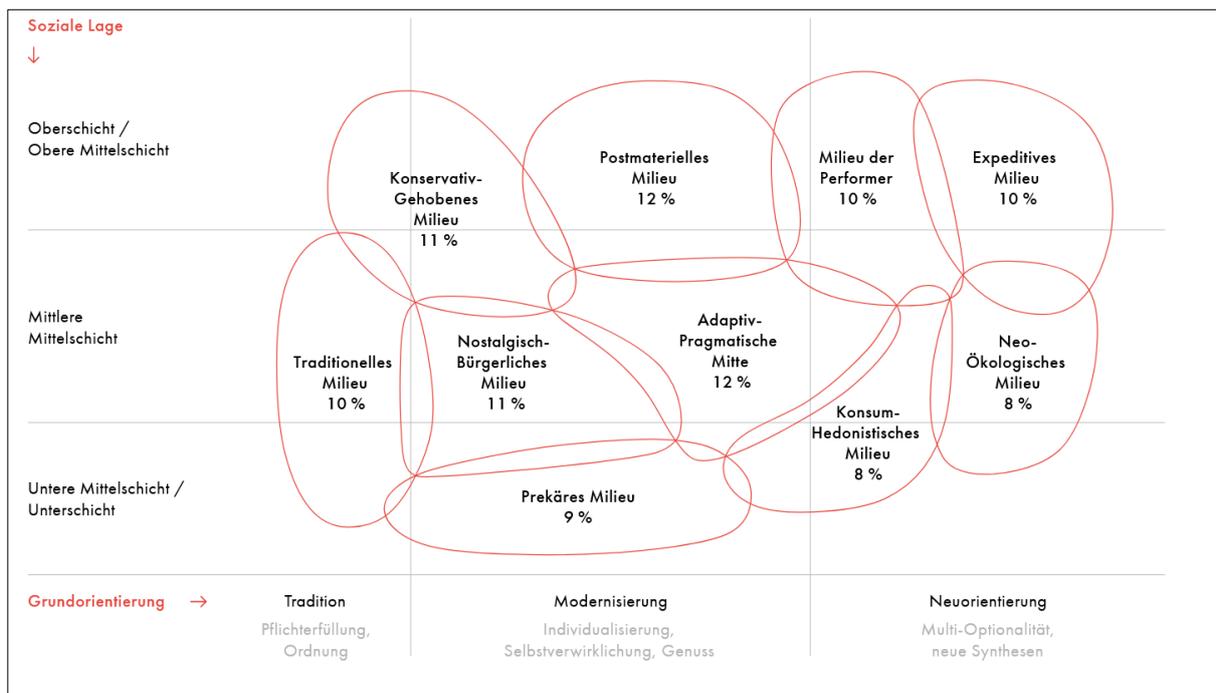
#### **Eigenschaften (Agenten)**

Den Mietenden werden initial entsprechend statistischer Verteilungen oder Befragungsdaten folgende Eigenschaften zugewiesen: die typische, regionale Demographie innerhalb des Quartiers (mögliche Datengrundlagen für diese Eigenschaften liefert das Genesis-Tool von Destatis, 2023), das Haushaltseinkommen (Datengrundlagen könnten ebenfalls dem Genesis-Tool von Destatis entnommen werden), das soziale Milieu (Datengrundlagen dazu bietet beispielweise das Sinus-Institut (Borgstedt, 2023) an) und das Umweltbewusstsein (als mögliche Datengrundlage dafür kann die Umweltbewusstseinsstudie von Belz et al., 2022 fungieren). Diese Eigenschaften beeinflussen maßgeblich die Interaktions- und Verhaltensmöglichkeiten der Agenten. Abbildung 15 zeigt beispielhaft eine weithin anerkannte Gruppierung der Bewohnenden entsprechend der sogenannten SINUS-Milieustudie. Die Liste der Eigenschaften kann bei entsprechender Datenlage beliebig erweitert werden und damit die Realitätsnähe gesteigert werden.

#### **Wahrnehmungen (Agenten)**

Die Agenten werden mit Rezeptoren zur Wahrnehmung ihrer Umgebung modelliert. Die Umgebungseigenschaften sind zum Beispiel die Attraktivität des Wohnquartiers inklusive des sozialen Umfeldes, des Grünanteils oder der Betroffenheit durch Extremwetterereignisse. Die Wahrnehmungen führen zu Interaktionen und schließlich zu einem bestimmten Verhalten bzw. Handlungen.

**Abbildung 15: SINUS Milieus**



Quelle: Borgstedt, 2023

### Interaktionen (Agenten)

Eine besondere Stärke der ABM ist die Möglichkeit der Abbildung von Interaktionen zwischen den Agenten untereinander als auch gegenüber dem Immobilienunternehmen oder weiteren externen Akteuren. Diese Interaktionen spielen insbesondere in Quartieren mit Wohneigentum eine Rolle, da hier die Agenten nicht nur passiv reagieren, sondern auch aktiv die Anpassungskapazität verändern können.

### Handlungen/Verhalten (Agenten)

Alle vorgenannten Charakteristiken beeinflussen schließlich die Entscheidungen der Agenten im hier betrachteten Teilmodell. Im vorliegenden Anwendungsfall ist dies der Fort- oder Zuzug aus bzw. in das entsprechende Quartier. Diese Handlungen führen zu veränderten Quartierseigenschaften, zum Beispiel hinsichtlich des Leerstandes oder der sozialen Durchmischung. Genau diese für die Realitätsnähe des Modells entscheidenden Schwellwerte bzw. Auslöser (Trigger) für Handlungen der Agenten sind jedoch am schwierigsten zu bestimmen. Für die Quantifizierung des Modells müssen diese sogenannten „Soft Variables“ mit Hilfe der Methoden der empirischen Sozialforschung aufwändig erhoben werden (siehe Abschnitt 4.6).

### Modelllauf

Mit jedem Modelllauf werden sowohl die Quartierseigenschaften als auch jene der Agenten aktualisiert. Das Verhalten der Agenten bestimmt somit direkt die Quartierseigenschaften. Diese wiederum bestimmen das Handeln des Agenten „Immobilienunternehmen“. Jede Handlung des Immobilienunternehmens bestimmt die Quartierseigenschaften, die wiederum das Verhalten der bewohnenden Agenten beeinflussen. So können realitätsnahe, rekursive, nichtlineare Entwicklungen und komplexe Systemdynamiken abgebildet werden. Zukünftig könnte das ABM-Modellkonzept auf ein Einfamilienhausquartier erweitert werden, da hier die Handlungsoptionen noch breiter und die sozialen Interaktionen der Vielzahl an Grundstückseigentümer\*innen noch bedeutender für eine Entscheidung für oder gegen eine Anpassungsmaßnahme sind.

Alternativ ist auch die Kombination der beiden oben beschriebenen quantitativen Modellkonzepte denkbar. Hierbei könnte eine ABM-basierte Komponente in die SDM integriert werden, um die jeweiligen Vorteile beider Ansätze zu nutzen (sogenanntes Hybrid Modelling).

### **Wirkung der Politikinstrumente**

Um die Wirkungen der drei Politikinstrumente (informatorisches, regulatorisches und ökonomisches) im beschriebenen ABM-Modellkonzept zu testen, wird ihr jeweiliger Einfluss als Intervention auf die bestimmten Modellparameter, d. h. auf die Eigenschaften aller Agenten, die Wahrnehmung, sowie die Interaktion der Agenten simuliert, und ihre Wirkung auf das Handeln (Verhaltensänderung) gemessen. Beispielsweise wird das informatorische Instrument einerseits die Wahrnehmung des Agenten „Immobilienunternehmen“ und andererseits die Interaktion der bewohnenden Agenten verändern. Das ökonomische Instrument führt zu einer Erhöhung der wirtschaftlichen Motivation des Agenten „Immobilienunternehmen“ zur Umsetzung von AM. Gleichzeitig steht die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit jedoch eng in Zusammenhang mit den aktuellen Quartierseigenschaften, insbesondere dem Leerstand und der sozialen Durchmischung. Nun lassen sich durch simulierte Änderungen der Quartierseigenschaften (Attraktivitätsrückgang durch Betroffenheit von Extremereignissen) die Verhaltensänderungen der Mietenden in ihrer Quantität und über den Zeitverlauf messen. Diese bestimmen wiederum den Schwellwert für die Wirtschaftlichkeit und damit den Zeitpunkt der Umsetzung durch den Agenten „Immobilienunternehmen“. Für die eher langfristigen Rückkopplungseffekte, die sich aus den veränderten natürlichen Quartierseigenschaften (bzw. durch mehrjährige Dürren) ergeben, müssen die Modellläufe entsprechend langfristig gewählt werden. Auch sollten in die ABM-Modellierung weitere Quartiere mit Wohneigentum einbezogen werden, da insbesondere informatorische Politikinstrumente Einfluss auf die Interaktionen und Wahrnehmung der vielen bewohnenden Akteure haben, die hierbei nicht nur passiv durch ihr Verhalten (Fort- und Zuzüge) indirekt die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, sondern auch aktiv in die Rolle der Umsetzenden gehen. Auch wenn das ABM-Modellkonzept genau für die Wirkungsanalyse dieser Instrumente in diesen Quartieren besonders gut geeignet scheint und ist, besteht auch hier die Herausforderung der realitätsnahen Schwellwertbestimmung. Diese müssen, wie oben und im folgenden Abschnitt 4.6 beschrieben, aufwändig ermittelt bzw. erhoben werden.

## **4.6 Benötigte Daten für die Testmodelle**

*Welche* Daten für die Modelle benötigt werden, hängt sehr stark von den jeweiligen Systemmodellierungsmethoden und deren Detailgrad (individuell bis aggregiert) ab. Auch die Art der Datenerhebung (qualitativ bis quantitativ) ist ein grundlegender Faktor für die Frage nach der erforderlichen Datenauswahl und dem Beschaffungsaufwand. Qualitative Systemmodellierungsansätze (wie z. B. CLD) benötigen keine quantitativen Daten und können üblicherweise mit einem deutlich geringeren Aufwand als quantitative Modelle, v. a. aber dynamische Simulationsmodelle wie ABM oder SDM, erstellt werden (mehr dazu in Abschnitt 3.2.3). Der Aufwand bemisst sich dabei nach der Art der Einflussgröße bzw. der Variablen.

Beim in Abschnitt 4.5.1 vorgestellten CLD-Modell werden v. a. qualitative Daten benötigt, genauer gesagt, Daten darüber, inwiefern und in welchem Ausmaß Variablen von anderen beeinflusst werden. Dies dient der Reduktion des CLD auf die für die Abbildung der Systemstruktur wesentlichen Variablen sowie Verbindungen zwischen diesen. Die quantitativen Zusammenhänge zwischen den Variablen sind dabei unwesentlich und werden bei diesen qualitativen Modellen v. a. zur Prüfung und Verdeutlichung der Modellaussagen benötigt. Als Beispiel stellt sich beim entwickelten CLD die Frage, ob die Motivation des Immobilienunternehmens zur Umsetzung von AM wirklich sinkt, wenn die Anpassungskapazität des Quartiers bezüglich Extremereignissen steigt. Das Vorhandensein von qualitativen und quantitativen

Daten hilft also auch der Validierung und Plausibilisierung des CLD-Modells. Sollte ein CLD viele Feedback-Loops aufweisen, können quantitative Daten auch hilfreich sein, die wesentlichen Loops im Modell zu identifizieren. Eine Erweiterung von CLD ist die semi-quantitative Systemmodellierungsmethode Fuzzy Cognitive Mapping. Hier werden den Verbindungen im CLD oder in Concept Maps gewisse Wichtungen gegeben, d. h. es sind nicht alle Verbindungen gleichwertig, wie dies beim CLD üblicherweise der Fall ist. Das hilft einerseits, einfacher dominante Prozesse und Feedback-Loops zu ermitteln, andererseits werden hierfür mehr Systemwissen und entsprechend auch mehr Daten qualitativer und quantitativer Art benötigt.

Im Gegensatz zu dem vergleichsweise geringen Aufwand für die Beschaffung benötigter Daten für qualitative Systemmodellierungsansätze, wie das entwickelte CLD-Modell, bedarf es zur Erstellung der quantitativen SDM und ABM deutlich mehr Daten, v. a. quantitativer Art. Das auf dem CLD basierende SDM benötigt zur Parametrisierung für die Vielzahl an Gleichungen für die aggregierten Variablen (und derer Verbindungen) verschiedenste Formen an Daten. Auch das ABM benötigt für Entscheidungsregeln quantitative Daten, die jedoch aufgrund der betrachteten Individualität und Detailtiefe dieser Modellierungsmethode noch deutlich umfangreicher und aufwendiger zu beschaffen sind. Die Art der benötigten quantitativen Daten ist (wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben) dabei sehr unterschiedlich und soll für das im Abschnitt 4.5.2 entwickelte SDM und das in Abschnitt 4.5.3 entwickelte ABM exemplarisch aufgezeigt werden:

- ▶ **Einfach zu ermittelnde Variablen („Hard Variables“):** Sie stellen einfach zu quantifizierende Variablen der Modelle dar. In den vorgestellten SDM und ABM ist dies unter anderem der Leerstand von Wohnungen innerhalb des betrachteten Quartiers. Dieser Leerstand ergibt sich aus der Anzahl aller Wohnungen abzüglich der Anzahl vermieteter Wohnungen. „Hard Variables“ lassen sich durch Recherche leicht ermitteln. Meist sind sie mit wenig Aufwand verfügbaren Dokumenten oder Datenbanken zu entnehmen und können direkt verwendet werden.
- ▶ **Aufwendig zu ermittelnde Variablen:** Es handelt sich um Variablen, die nur durch eine intensive Recherche quantifiziert werden können. In dem entwickelten SDM ist dies etwa die Variable „Mittlere Mietpreise“ im Quartier mit ihrer Wirkung auf die „Attraktivität des Quartiers für Bewohnende“. Derartige Variablen lassen sich nur durch aufwendigere Recherchen oder Expert\*innen-Einschätzungen quantifizieren. Häufig weisen sie aufgrund dieser Daten eine gewisse Unschärfe auf.
- ▶ **Sehr aufwendig zu ermittelnde soziale Variablen („Soft Variables“):** Diese Kategorie umfasst soziale Variablen (englisch „Soft Variables“), die äußerst schwer zu quantifizieren sind. Zur Beschaffung der Daten werden meist Methoden der empirischen Sozialforschung benötigt (z. B. Social Data Analysis, Befragungen). Soziale Variablen sind zum Beispiel individuelle Entscheidungen für oder gegen Innovationen. Aufgrund der Komplexität menschlichen Verhaltens (inklusive dessen Individualität und eingeschränkter Rationalität) lassen sie sich nur mit hohem Aufwand quantifizieren. In den entwickelten SDM ist eine solche Variable die „Motivation(-sänderung) des Immobilienunternehmens für die Umsetzung von AM“ in Abhängigkeit der Einflussfaktoren „Betroffenheit“, „Wirtschaftlichkeit“, „Finanzierbarkeit“, „Problembewusstsein“ und „Wissen“. Diese Erhebungen sind sehr ressourcenintensiv und weisen trotz größter Sorgfalt in der Erhebung meist eine hohe Unsicherheit auf. Soziale Variablen sind jedoch gerade bei akteursorientierten ABM von großer Bedeutung, in denen sie im Vergleich zu SDM für individuelle Akteure bzw. Akteursgruppen benötigt werden, und nicht im gesellschaftlichen Mittel.

Aus dieser Aufgliederung der Datenarten folgt, sobald soziale Variablen im quantitativen Simulationsmodell abgebildet werden sollen, ist der Aufwand zur Modellerstellung meist deutlich zeit- und kostenintensiver. Im Vergleich zum qualitativen Wirkungsmodell (z. B. CLD) ist der Aufwand erheblich größer. SDM und ABM können jedoch deutlich tiefgreifendere Erkenntnisse über die Auswirkungen von Politikinstrumenten auf die Systemdynamiken hervorbringen. Dazu zählen etwa Kippunkte oder nicht intendierte Dynamiken, ausgelöst durch nicht bedachte Nebeneffekte des Politikinstrumentes. Wie bereits erwähnt, bilden SDM im Top-Down-Ansatz die Wechselwirkungen zwischen – oft gesellschaftlichen – *Mittelwerten* ab. Demnach stellt sich bei SDM die Frage danach, inwiefern sich die Änderung einer *mittleren* Kenngröße auf eine andere auswirkt. Ein Beispiel aus dem entwickelten SDM wäre, wie der gemittelte Wert der „*Attraktivität des Quartiers für Bewohnende*“ den „*Mittleren Mietpreis*“ und die damit einhergehende Intensität des Wegzugs aus dem Quartier beeinflusst. Im Gegensatz dazu ermöglicht ABM durch den Bottom-Up-Ansatz eine detailliertere Beschreibung der sozialen Wechselwirkungen von Einflussgrößen auf individuelles Akteursverhalten. Hier stellt sich jedoch die noch aufwendiger zu beantwortende Frage nach den Schwellwerten für *individuelle* Entscheidungen von Akteure. Diese können stark divergieren und bedeuten meist einen noch größeren Aufwand zur Erhebung als gemittelte Werte für SDM. Im entwickelten ABM wäre der Schwellenwert jener, ab dem Bewohnende der verschiedenen Sinus-Milieus aufgrund ihrer individuellen Wahrnehmung der „*Attraktivität des Quartiers*“ höhere Mietpreise akzeptieren und nicht wegziehen würden.

Aufgrund der Unterschiede im Aggregationsgrad bzw. der Detailtiefe ist die Datenerhebung für ABM-Modelle, die die individuellen Akteursentscheidungen simulieren, deutlich höher als bei SD-Modellen, welche mittlere Kenngrößen abbilden. Hinzu kommt, dass soziale Variablen („Soft Variables“) aufgrund ihrer Komplexität nur mit einer gewissen Unschärfe bestimmt werden können. Allein aus diesem Grund bleiben SD- und ABM-Modelle immer nur Annäherungen an die Realität. Dementsprechend können sie keine genauen Vorhersagen über die zukünftigen Entwicklungen eines Systems treffen. Aus diesem Grund ist die richtige Wahl der angemessenen Methode bei prioritär sozialen Fragestellungen sehr wichtig. Für soziale Systemmodellierungen können qualitative Methoden wie z. B. CLD unter Umständen sehr sinnvoll sein. Ihre Aussagekraft ist hoch, und ihre Erstellung ist nicht sehr aufwendig. Gerade wegen der geringeren Ressourcen sind die qualitativen Methoden für viele Einsatzbereiche eine – abhängig von der Fragestellung – passfähige Alternative. Dies ist v. a. der Fall, wenn die Aussagekraft von SDM oder ABM durch eine hohe Anzahl an sozialen Variablen in ihren Aussagen so unsicher bleibt, dass sie evtl. keinen deutlichen Mehrwert zu qualitativen Systembetrachtungen und Wirksamkeitsmodellierungen von Politikinstrumenten bieten.

## 4.7 Erkenntnisse aus den Praxisworkshops

Im Rahmen des Modellierungstestes wurden zwei halbtägige Praxisworkshops im Online-Format durchgeführt, mit dem Ziel, die praktische Anwendbarkeit von Systemmodellierungsansätzen zur Einschätzung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten zu diskutieren. Um die Praxisrelevanz dieser Workshops zu gewährleisten, wurde das gleiche Thema wie mit dem UBA für die Erstellung der Testmodelle vereinbart durchgeführt, nämlich die Umsetzung von AM des Schwammstadtkonzeptes in Wohnquartieren. Inhalt des ersten Workshops war die Einführung der Teilnehmenden in mögliche Systemmodellierungsansätze mit Diskussion zu ihrem Mehrwert und ihren Limitierungen für die Bewertung der Wirkung von Politikinstrumenten sowie der Praxis-Test von Elementen der partizipativen Modellierung. Im zweiten Workshop wurde ein erstes qualitatives CLD-Modell (ähnlich zu Abbildung 7 bis Abbildung 10) präsentiert und im Anschluss diskutiert. Der stark inter- sowie transdisziplinäre Teilnehmerkreis setzte sich aus

Vertreter\*innen des Behördennetzwerks „Klimawandel und Klimaanpassung“, Mitarbeitenden des UBA, des BfN, BBSR, der Universität Leipzig, der Berliner Regenwasseragentur, des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie sowie der Freien Hansestadt Bremen zusammen. Die Teilnehmenden wurden entsprechend ihrer Expertise zum Thema Umsetzung des Schwammstadt-Konzeptes und Wissen zur Bewertung von Politikinstrumenten in der Praxis ausgewählt. Die Workshops verfolgten mehrere Ziele:

- ▶ Vermitteln von Ansätzen und Methoden qualitativer und quantitativer Systemmodellierungen zur Bewertung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten an die Teilnehmenden des Workshops.
- ▶ Partizipative Modellierung zur Erstellung eines CLD unter Nutzung von „Group Model Building“ (Hovmand, 2014; Scott, 2018; Vennix, 1996) innerhalb des ersten Workshops und Erweiterung der bisherigen Modelle (ST, SD, ABM).
- ▶ Validierung der Wirkungszusammenhänge der bisherigen Modelle (ST, SD, ABM) durch die interdisziplinäre Expertise der Teilnehmenden zur Wirksamkeit von Politikinstrumenten zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung des Regenwasserrückhalts.
- ▶ Vorstellung der Erkenntnisse des (konzeptuellen) Modellierungsprozesses im zweiten Workshop (benötigte Daten, Lenkungswirkung, Möglichkeiten und Grenzen).
- ▶ Gemeinsame Diskussion zum Mehrwert und Anwendbarkeit von qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen zur Einschätzung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten innerhalb der Prozesse der Politikberatung.

#### **4.7.1 Erster Workshop „Modellierung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten am Beispiel der Umsetzungsdynamik des Regenwasserrückhaltes**

Im ersten Workshop „*Modellierung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten am Beispiel der Umsetzungsdynamik des Regenwasserrückhaltes*“ wurden den Teilnehmenden die bisherigen Erkenntnisse der strukturierten Literaturrecherche zu Ansätzen der qualitativen und quantitativen Systemmodellierungen- und Simulationen (Schünemann et al., 2023) kurz erläutert. Ein Teil des Workshops wurde für die Einführung und teilweise Durchführung der partizipativen Modellierung (*Group Model Building*) zur Erstellung eines CLD aufgewendet. Dafür wurde ein Online-Whiteboard für eine digitale Zusammenarbeit genutzt. Zu Beginn der gemeinsamen Systemmodellierung notierten die Teilnehmer\*innen die ihrer Erfahrung nach wesentlichsten Einflussgrößen auf die Implementationsdynamik von Schwammstadt-AM in Quartieren. Die Einflussgrößen wurden dann mit den Variablen aus einem vorab vom Modellierungsteam erstellten CLD abgeglichen und erweitert. Diese Lerneinheit stellte eine Einführung in Modellierungsprozesse für die Teilnehmer\*innen dar. Umgekehrt konnten die Teilnehmer\*innen aber auch ihre fachliche Expertise und Kritik einbringen, wodurch das qualitative CLD weiterentwickelt und validiert wurde. Die wesentlichsten, gemeinsam mit den Workshop-Teilnehmenden erarbeiteten Einflussfaktoren auf die Umsetzung von AM sind:

- ▶ Potenzielle Extremwetterereignisse und Betroffenheit
- ▶ Finanzierbarkeit
- ▶ Bewusstsein für Klimawandel
- ▶ Wissen über Maßnahmenumsetzung
- ▶ Quartiersrobustheit durch Anpassungskapazitäten

- ▶ Quartiersattraktivität für Bewohnende
- ▶ Handlungsdruck auf Kommunen

Im zweiten Schritt wurde aufgezeigt, wie die Problemstellung mit den quantitativen Systemmodellierungsansätzen SDM und ABM modelliert und inwiefern Mehrwerte zum vorgestellten CLD zu erwarten wären. Der Workshop endete mit einer Feedbackrunde zu den vorgestellten Systemmodellierungsansätzen und der Diskussion zum Mehrwert und Grenzen von Systemmodellierungen in der Politikberatung. Diese ergab Rückmeldungen zu den teilweise noch fehlenden Ausdifferenzierungen einzelner Wirkungszusammenhänge im CLD. Auch wurde die auffallend sozialwissenschaftliche Ausrichtung der vorgestellten Modellstrukturen thematisiert, die z. B. hydrologische Wirksamkeiten noch ignorieren. Auch seien bautechnische Randbedingungen, beispielsweise Fläche oder Baustatik, institutionelle Voraussetzungen (festgelegte Entscheidungsprozesse innerhalb verschiedener Arten von Wohnungsgenossenschaften) oder Heterogenität der Bewohner\*innenstruktur noch zu wenig in die Systemmodellierungen eingeflossen. Weitere Kritikpunkte betrafen die Außerachtlassung subjektiver Betroffenheitswahrnehmung von Extremwetterereignissen oder Paradoxien im Entscheidungsverhalten sowie Konkurrenzen um Aufmerksamkeit und Kapazitäten bei den simulierten Mieter\*innen. Die Rückmeldungen zeigten dabei deutlich, dass die Kritikpunkte stark von der jeweiligen Expertise der Teilnehmenden abhingen, was bei der Modellierung komplexer Systeme ein übliches Phänomen ist (Hovmand, 2014).

Am Ende des Workshops wurden die Möglichkeiten der Modellierungsansätze, soziale Aspekte und interdisziplinäre Komplexitäten in der Wirkungsanalyse von Politikinstrumenten zu berücksichtigen, als vielversprechende Erweiterung bisheriger Bewertungsansätze gewürdigt. Die Verbesserungsvorschläge für den zweiten Workshop betrafen vor allem die Klarstellung zur tatsächlichen Wirksamkeitsmessung und zu Abschätzung des Mehrwerts dieser Systemmodellierungen für die Bewertung von Politikinstrumenten in der Beratungspraxis. In Bezug auf Letzteres wünschten sich die Teilnehmer\*innen eine eindeutige Einordnung dazu, an welcher Stelle im Beratungsprozess Modelle dieser Art erstellt und in welchen Phasen eher qualitative oder quantitative Simulationsmodelle eingesetzt werden könnten.

#### **4.7.2 Zweiter Workshop „Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten – Umsetzung in der Praxis“**

Das Feedback aus dem ersten Workshop wurde aufgegriffen und für die Gestaltung des zweiten Projektworkshops „*Modellierung der Wirksamkeit von Politikinstrumenten – Umsetzung in der Praxis*“ genutzt. In diesem sollte die Frage beantwortet werden, wann qualitative und wann quantitative Systemmodellierungsansätze die Wirksamkeitsbewertung von politischen Instrumenten am effizientesten unterstützen können. Weiterhin war Gegenstand des Workshops, welche Daten und Informationen für die Quantifizierung der beispielhaft am Themenfeld der Schwammstadt entwickelten SDM und ABM benötigt werden und wie sich diese ermitteln lassen. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass die Datenerhebung vor allem für soziale Einflussgrößen sehr zeit- und kostenintensiv ist. Gegenüber den qualitativen Systemmodellierungen bedeutet dies einen erheblichen Mehraufwand im Modellierungsprozess. Ein Vergleich zwischen beiden untersuchten quantitativen Modellen zeigt, dass ABM aufgrund der Abbildung individueller Entscheidungen und detaillierteren notwendigen Informationen wiederum aufwendiger zu quantifizieren ist als die SDM, ABM aber durchaus noch tiefere Erkenntnisse zur sozialen Wirkung von Politikinstrumenten aufzeigen kann. Die Rückmeldungen aus dem Kreis der Workshopteilnehmenden in der offenen Schlussdiskussion zu Anwendbarkeit, Mehrwert und Limitierungen von ST, SD und ABM Systemmodellierungen in der Politikberatung waren

generell sehr positiv. Die Chancen der Modellierungsmethoden zur Prüfung der Lenkungswirkung von Politikinstrumenten in sehr komplexen Problemstellungen und die starke Berücksichtigung sozialer Aspekte wurden von allen 11 Teilnehmenden erneut hervorgehoben. Allerdings wurden die Möglichkeiten der Systemmodellierungsmethoden in der praktischen Umsetzung sehr unterschiedlich bewertet. Einige Teilnehmer\*innen sprachen sich dafür aus, die in den Modellierungen berücksichtigte Komplexität noch deutlich zu erweitern, um die komplexen Wirkungen von Politikinstrumenten möglichst ganzheitlich abzubilden („unterkomplexe Modelle führen zu unterkomplexen Lösungen“). Andere plädierten dagegen aus Gründen der langen Bearbeitungsdauer und begrenzten Kapazitäten in der Praxis für eine Komplexitätsreduktion der Modellierungen, damit Entscheidungsträger\*innen trotz knapper Zeitressourcen von den Ergebnissen profitieren könnten. Diese Aussagen verdeutlichen sehr gut die Anforderungsbreite, der sich die Systemmodellierungsansätze in der Politikberatung stellen müssen. Einerseits sollen sie komplexe Prozesse möglichst ganzheitlich beleuchten, um nicht-intendierte Nebeneffekte und nicht-lineare Dynamiken bei neu eingeführten Politikinstrumenten aufzuzeigen. Andererseits bleibt oft zu wenig Zeit, um die Modelle auszuarbeiten. Dieses Dilemma betrifft vor allem die ressourcenintensiven quantitativen Systemmodellierungen wie SDM und ABM.

Eine weitere Feststellung im Kontext der Diskussion war, dass sich die qualitativen Systemmodellierungen aufgrund des geringeren Aufwands einfacher für eine über bisherige Methoden hinausgehende Analyse zur Wirksamkeit von Politikinstrumenten umsetzen lassen als die Einbindung der wesentlich aufwendigeren quantitativen Methoden. Ferner wurde konstatiert, dass Bundesministerien bislang kaum Systemmodellierungsansätze zur Veranschaulichung komplexer Prozesse nutzen. Das betrifft sowohl die quantitativen als auch die qualitativen Methoden. Laut den Fachexpert\*innen hätten die Methoden jedoch ein großes Potenzial, zukünftig genutzt zu werden. Mit ihrer Hilfe könnten soziale Prozesse wie Akzeptanz oder Ablehnung mit physikalischen Wirksamkeiten verknüpft werden und so mögliche politische Maßnahmen besser abgeschätzt werden.

#### **4.8 Hypothetische Anwendbarkeit der Testmodelle in der Politikberatung**

Die vorgestellten Systemmodellierungsmethoden zur Abbildung von komplexen Systemen haben das Potenzial, die Beratung zur Entwicklung effizienter Politikinstrumente zu unterstützen, indem sie die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen sowie soziale Verhaltens- und Interaktionsdynamiken abbilden können. Sie können sehr profunde Aussagen über komplexe Systemstrukturen, nicht-lineare Dynamiken, Verhalten, Eintrittswahrscheinlichkeiten, Kippunkte und Kritikalität oder Nebeneffekte liefern. In der bereits publizierten Literaturrecherche zu qualitativen und quantitativen Systemmodellierungs- und Simulationsverfahren (Schünemann et al., 2023) und in Abschnitt 3.4. dieses Berichts wurden die Chancen und Limitierungen der Methoden für die Politikberatung im Allgemeinen erörtert. An dieser Stelle werden die Möglichkeiten und Grenzen zur Nutzung der Systemmodellierungsansätze in Bezug auf die exemplarische Modellierung zum „Schwammstadt/ Regenwasserrückhalt“-Konzept analysiert.

##### **Nutzbarkeit der Modelle in der Politikberatung**

Bauliche, ökonomische und soziale Anpassungen an den Klimawandel sind eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die oft gegen Widerstand durchgesetzt werden und im Sinne der sozialen Gerechtigkeit organisiert werden muss. Einzelne Politikinstrumente oder Policy-Mixes entstehen auf mehreren Ebenen des politischen Systems und können Mängel aufweisen und damit Ungerechtigkeiten erzeugen. Die exemplarischen Modellierungen wurden für das Themenfeld der Umsetzung des Schwammstadtkonzeptes als kommunale Aufgabe durchgeführt. Dabei

befinden sich Kommunen in der Zwangslage, sich nicht nur den Anforderungen höherer politischer Instanzen, sondern auch den Bedürfnissen der Einwohner\*innen gegenüber verantworten zu müssen. Die präsentierten Public-Policy-Modellierungen (CLD, SD, ABM) können dazu beitragen, diese Prozesse bereits im Vorfeld (ex-ante) abzubilden. Aufgrund ihrer Charakteristika können sie bei valider Modellierung verhältnismäßig objektive und neutrale Ergebnisse liefern. Auf diese Weise können sie die bisher tendenziell subjektivere, weil personenbezogene Politikberatung sinnvoll ergänzen. Insgesamt ermöglichen die Modelle also eine bessere Vorbereitung, Anpassung und Akzeptanz von Politikmaßnahmen in der Praxis. Die operative Umsetzung kann dadurch nicht nur effektiver und ganzheitlicher betrachtet werden, sondern auch gerechter geschehen. Speziell die Kommunen können damit effektiver auf die komplexen Herausforderungen reagieren, auch im Hinblick auf den Klimawandel. Allerdings eignen sich nicht alle Modelle gleichermaßen für verschiedene Entscheidungsträger\*innen, wie z. B. hier die kommunale Verwendung. Nichtsdestotrotz können auch höhere politische Ebenen, wie Länder, Bund oder europäische Regionen, aus den Modellierungen Erkenntnisgewinn generieren, vor allem, wenn größere Maßstäbe analysiert werden sollen. Allerdings können höhere politische Instanzen auch von kleiner dimensionierten Fragestellungen profitieren, denn daraus können wichtige Informationen zu potentieller Unterstützung für kommunale Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden.

### **Causal Loop Diagram (Systems Thinking Ansätze)**

CLDs sind nützlich, um die Modellierungsfragen nach der komplexen Wirkung der Politikinstrumente qualitativ zu untersuchen. Sie erweitern die Betrachtung der Frage, indem sie zwischen verstärkenden und ausgleichenden Feedback-Loops unterscheiden. Sie zeigen, wie sich Veränderungen in einem Faktor auf einen anderen Faktor auswirken. Damit setzen sie den Fokus auf nicht-lineares dynamisches Systemverhalten durch die visuelle Darstellung der Systemstrukturen. CLDs können partizipativ erstellt werden, wobei eine möglichst große Einbindung an Stakeholdern und Fachexpert\*innen die Qualität des Modells verbessert. Eine Stärke ist auch die visuelle Darstellung der Modelle, die Verständnis für die komplexen Prozesse schaffen kann, die ein Politikinstrument auslöst. Ihre Vorteile liegen vor allem auch darin, dass die Betroffenen, in diesem Fall die Mieter\*innen, das Immobilienunternehmen und die Kommune, partizipativ beteiligt werden können. Dadurch fließen die mentalen Modelle ein und berücksichtigen damit die konkreten lokalen Gegebenheiten oder persönliche Einstellungen zu den Anpassungen an das Schwammstadtkonzept und die damit einhergehenden Maßnahmen. Alle Beteiligten erfahren Lerneffekte in Bezug auf die Meinungen anderer Beteiligten und hinsichtlich des Themas selbst. Das gilt vor allem dann, wenn die grafische Aufbereitung verständlich und strukturiert ist. Dadurch können beispielsweise die individuelle Reflektionsfähigkeit und Konsensfähigkeit zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen angeregt werden. Auch die Modellergebnisse werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit akzeptiert. Im Anwendungsfall könnte dieser Lerneffekt darin bestehen, dass die Einführung eines einzelnen Politikinstrumentes risikoreiche divergierende Dynamiken auslösen kann, weshalb die Umsetzung eines Policy-Mix für alle Beteiligten einen sinnvolleren und gerechteren Ansatz darstellt. Abgesehen davon dauert der Modellierungsprozess beim CLD nicht sehr lange und ist wenig ressourcenintensiv, sodass er innerhalb kurzer Zeit Ergebnisse liefert und so die weiteren politischen Aushandlungsprozesse beschleunigt, was schnelllebiger Politik zugutekommt. Die Nachteile bestehen darin, dass die Beteiligten für die Modellierung erst gewonnen werden müssen. Zudem ist es unmöglich, alle Beteiligten zu involvieren, was Limitierungen bei der Modellqualität und eine verringerte allgemeine Akzeptanz der Modellerkenntnisse erzeugen kann. Da auch CLD profundere Erkenntnisse liefern, je mehr Variablen und Einflussgrößen erfasst werden, können diese Modelle sehr komplex und unübersichtlich werden. Das Modellierungsteam und der/die Moderator\*in des partizipativen Modellierungsprozesses können diesem Problem durch

geeignete Festlegung der Systemgrenzen, partielle Reduktion der Komplexität des Modells und Darlegen der wesentlichen Modellerkenntnisse begegnen.

### **System Dynamics**

Das CLD kann auf ein quantitatives SDM erweitert werden, indem es parametrisiert wird. Das SDM zeigt komplexe Systemdynamiken im zeitlichen Verlauf auf, es identifiziert unbeabsichtigte Nebeneffekte und Wechselwirkungen. Es erzeugt vor allem ein besseres Verständnis dafür, welche Auswirkungen Entscheidungen, wie zum Beispiel die Einführung von Politikinstrumenten, auf das komplexe System haben. Dafür werden aggregierte Daten benötigt, sodass keine individuellen, sondern gemittelte Einflussgrößen abgebildet werden. Obwohl soziale Daten damit vereinfacht modelliert werden, ist deren Parametrisierung sehr zeit- und ressourcenintensiv, um eine ausreichende Datengrundlage in das Modell einzubinden. Das SDM dient außerdem nicht der Vorhersage, sondern verbessert das Systemverständnis, in dem die Politikinstrumente wirken und bleibt v.a. in Bezug auf soziale Dynamiken methodenbedingt unscharf. SDM haben den Nutzen, dass sie, analog zum CLD, partizipativ erstellt werden können. Die Vorteile der partizipativen Modellierung treffen also auch hier zu (siehe oben). Durch die Parametrisierung der Daten bieten sie aber die Option auf profundere Aussagen zu Wirkungszusammenhängen und Systemdynamiken. Das ist vor allem dann wichtig, wenn die zeitliche Komponente für die Untersuchung die Wirksamkeitsanalyse des Politikinstrumentes besonders relevant/ von besonderer Bedeutung ist. Im exemplarischen Beispiel wurden Dürreereignisse betrachtet. Diesen ist eigen, dass sich die Auswirkungen auf die Umwelt und Betroffene teilweise erst nach Jahren zeigen. Durch diesen Umstand können Politikinstrumente, die präventiv eingeführt werden, auf Ablehnung stoßen, weil ihre Sinnhaftigkeit im scheinbar konträren Konzept „Schwammstadt“ bezweifelt oder nicht als akut wichtig empfunden wird. Schließlich lassen SDM einmal erstellt, verschiedenste und schnell durchführbare Experimente (Szenarienanalyse) zu, sodass mehrere Modellierungen sehr zügig durchgeführt und Aussagen getroffen werden können. Jedoch ist genau diese Erstellung von SDM sehr zeit- und ressourcenintensiv. Das hängt vor allem mit der Quantifizierung und Wartung zusammen, die präzise durchgeführt werden muss, da sich auch kleine Ungenauigkeiten prompt Systemkomplexitäten verfälschen können. Auch die Validierung sozialer Variablen und Einflussgrößen, wie beispielsweise „persönliche Betroffenheit“ oder „Attraktivität des Quartiers“, muss sorgfältig durchgeführt werden. Zuletzt stehen die Modellentwickler\*innen auch vor datenschutzrechtlichen Herausforderungen. In Summa ist das von SDM erzeugte Wissen sehr profund und dient damit allen Politikberater\*innen. Gleichwohl ist der hohe Ressourcenverbrauch, speziell der Zeitfaktor, ein großes Hemmnis für die Bewertung schnell einzuführender Politikinstrumente. Für die kommunale Politikberatung ist sie im Vergleich zu qualitativer Modellierung (wie CLD) aufgrund des höheren finanziellen Ressourcenaufwands deutlich weniger geeignet. Vielmehr könnten Hochschulen, Forschungsverbände oder höhere politische, langfristig eingerichtete, Beratungsgremien auf Bundesebene die Methode nutzen. Dafür wäre es aber im Sinne der Aussagekraft der Ergebnisse sinnvoll, den Maßstab der Modellierung über Quartiere hinaus auszudehnen und eine Verallgemeinerbarkeit der Modellerkenntnisse anzustreben.

### **Agent-Based Modelling**

ABM ist eine hilfreiche Methode zur Simulation sozialer Interaktionen in komplexen Systemen auf Mikroebene. Sie ermöglicht es, das dynamische Verhalten von Agenten wie Menschen, Tieren oder Objekten unter dem Einfluss sich ändernder Faktoren zu modellieren. ABM berücksichtigt dabei eine Vielzahl von Eingaben, darunter Agenten selbst, den Raum, die theoretische Grundlage für das Agentenverhalten und Regeln für die soziale Interaktion. Das Ergebnis ist eine Simulation, die das zeitliche Verhalten des Systems beschreibt, das sich aus den komplexen sozialen Interaktionen zwischen den Individuen ergibt. Die Einbeziehung individueller

Parameter (z. B. Unterschiede im Akteursverhalten) ist der größte Nutzen von ABM, denn es werden sehr profunde Aussagen möglich. Im Beispiel könnten mit ABM die individuellen Verhaltensveränderungen bei Mieter\*innen und der genaue Zeitpunkt der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen beim Immobilienunternehmen abgebildet werden. Aufgrund der sehr aufwendigen Parametrisierung der individuellen sozialen Einflussgrößen ist diese Methode allerdings auch die ressourcenintensivste der vorgestellten Verfahren. Die Einbindung sozialer – mit einer Unsicherheit in der Quantifizierung einhergehender – Variablen führt dazu, dass ABM wie auch SDM in ihren Erkenntnissen unscharf bleiben. Das bedeutet, sie dienen nicht der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung, sondern vielmehr einer „Was wäre wenn“-Analyse (Szenarien), um das System und die Wirkung von Politikinstrumenten besser zu verstehen und daraus Empfehlungen abzuleiten. Vor allem bei der individuelleren ABM gilt es in der Parametrisierung den Datenschutz einzuhalten. Zwar profitieren auch Kommunen von Modellierungen, die individuelle Einstellungen in den Blick nehmen, doch ist fraglich, ob die tatsächlichen Modellaussagen zu sehr individuellen Beweggründen den ressourcenstarken Aufwand für Kommunen erfüllen. Auch ihre langwierige und teure Erstellung könnte den Anforderungen der kommunalen Politik widersprechen. Wie im Falle von SDM dienen ABM eher höheren politischen Instanzen und Forschungsverbänden zur Analyse, wie mit Politikinstrumenten langfristig vorherrschende Probleme nachhaltig gelöst werden können.

Zusammenfassend können alle diese Methoden die bisherige Politikberatung sinnvoll ergänzen. Allerdings zeigt die Analyse, dass ihre Anwendungsschwerpunkte sich teils erheblich unterscheiden. Es muss also immer sehr genau abgewogen werden, welche Methode für welchen Zweck angemessen und adäquat ist. Qualitative Methoden verlangen Know-how, sind aber trotzdem wenig ressourcenintensiv. Sie sind vor allem dann nützlich, wenn Fragestellungen auf der politischen Agenda schnell beantwortet werden müssen und die Resultate zügig in den Entscheidungsprozess zurückfließen müssen. Anders ist es bei SDM und ABM, deren Aussagen zwar profunder und tiefergehend sind, aber nur über eine gesicherte langfristige Finanzierung und ausreichender Expertise zu verwertbaren Ergebnissen kommen können. Perspektivisch können sie die Politikberatung in höheren politischen, europäischen oder auch globalen Forschungsvorhaben zu relevanten komplexen Problemen der Gesellschaft unterstützen. Für die korrekte Methodenauswahl sollten die der Modellerstellung vorgelagerten Schritte (Kapitel 3.1) befolgt werden. Dazu gehören ganz besonders die Fragen nach Systemgrenzen, also danach, was genau modelliert werden soll und ob die Ziele auch über Nutzung der weniger aufwendigen qualitativen Modellierungsmethoden erreicht werden können. Schließlich müssen auf die in Abschnitt 3.3. definierten Wirksamkeitsvoraussetzungen beachtet werden, wozu in erster Linie ein spezifisches Prozesswissen und eine Akteursfeldanalyse für die entsprechenden Politikinstrumente zählen. Erst, wenn diese Fragen beantwortet werden können, kann die Methodenauswahl die Politikberatung inhaltlich und qualitativ fördern.

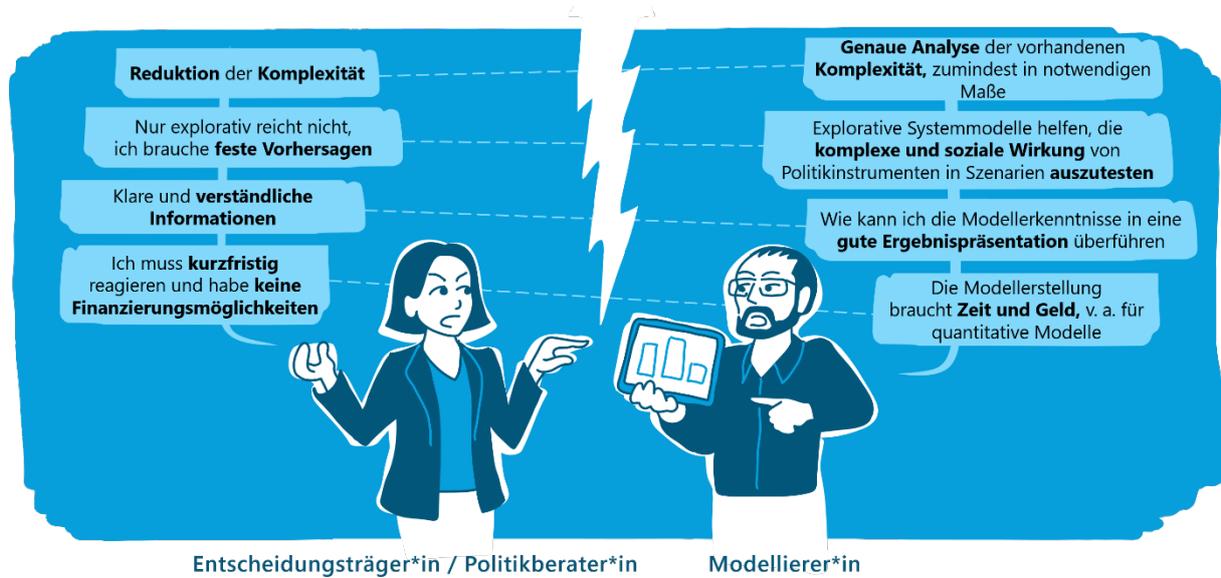
## 5 Factsheet zur Einführung in Systemmodellierungen für die Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten

Das Factsheet ist ein wesentliches Produkt und zentrales Resultat der Machbarkeitsstudie. Es soll kurz und übersichtlich in das Thema der Systemmodellierungen einführen und die wichtigsten Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie zusammenzufassen. Dazu soll es Interessierten aus Politik, Beratung und Wissenschaft einen einfachen Zugang zur Anwendbarkeit von Systemmodellierungen mit Fokus auf die drei erprobten Methoden, STM, SDM und ABM in der Politikberatung bieten. Letztlich handelt es sich um einen Beitrag zum Wissenstransfer. Daher bestand der Anspruch darin, in möglichst kurzer, visuell ansprechender Form und leicht verständlicher Sprache einen Überblick über Methoden, Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungspotenziale zu geben. Das Factsheet wird als eigenständige Publikation veröffentlicht werden und verweist auf die veröffentlichten Zwischen- und Abschlussberichte für vertiefte Informationen. Es erscheint in deutscher und englischer Sprache. An dieser Stelle werden daher lediglich die wesentlichen Inhalte kurz erläutert.

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen „komplexen Systemen“ und „komplexen sozialen Systemen“ werden zu Beginn erläutert. Stichwortartig wird beschrieben, wann sich die Anwendung qualitativer oder quantitativer Systemmodellierungen für die Wirksamkeitsüberprüfung von Politikinstrumenten empfiehlt. Darauf folgt ein Überblick über die verschiedenen Ansätze von Systemmodellierungen und ein kurzer Umriss der Spezifika qualitativer und quantitativer Systemmodellierungen. Zur besseren Veranschaulichung der Modellierungsmethoden werden die im Projekt entwickelten beispielhaften Systemmodelle kurz skizziert. Zu diesem Zweck werden auch die Grafiken, die in diesem Bericht verwendet werden (siehe Kapitel 4) benutzt. Teil des Factsheets ist auch die konzeptionelle Vorgehensweise bei der Erstellung von Systemmodellen für die Analyse der Wirksamkeit von Politikinstrumenten. Die Beschreibung der einzelnen Prozessschritte entspricht einer vereinfachten Darstellung der Abbildung 5 und der Erläuterungen in Kapitel 3.1 dieses Berichtes. Vor- und Nachteile komplexer Modellierungen, wie sie in diesem Bericht in Abschnitt 3.3 dargelegt werden, werden diskutiert und Hinweise auf Anwendungsmöglichkeiten von Systemmodellierungen in der Politikberatung (vgl. Abschnitt 3.4, 3.5 und 4.8 dieses Berichts) zusammengetragen.

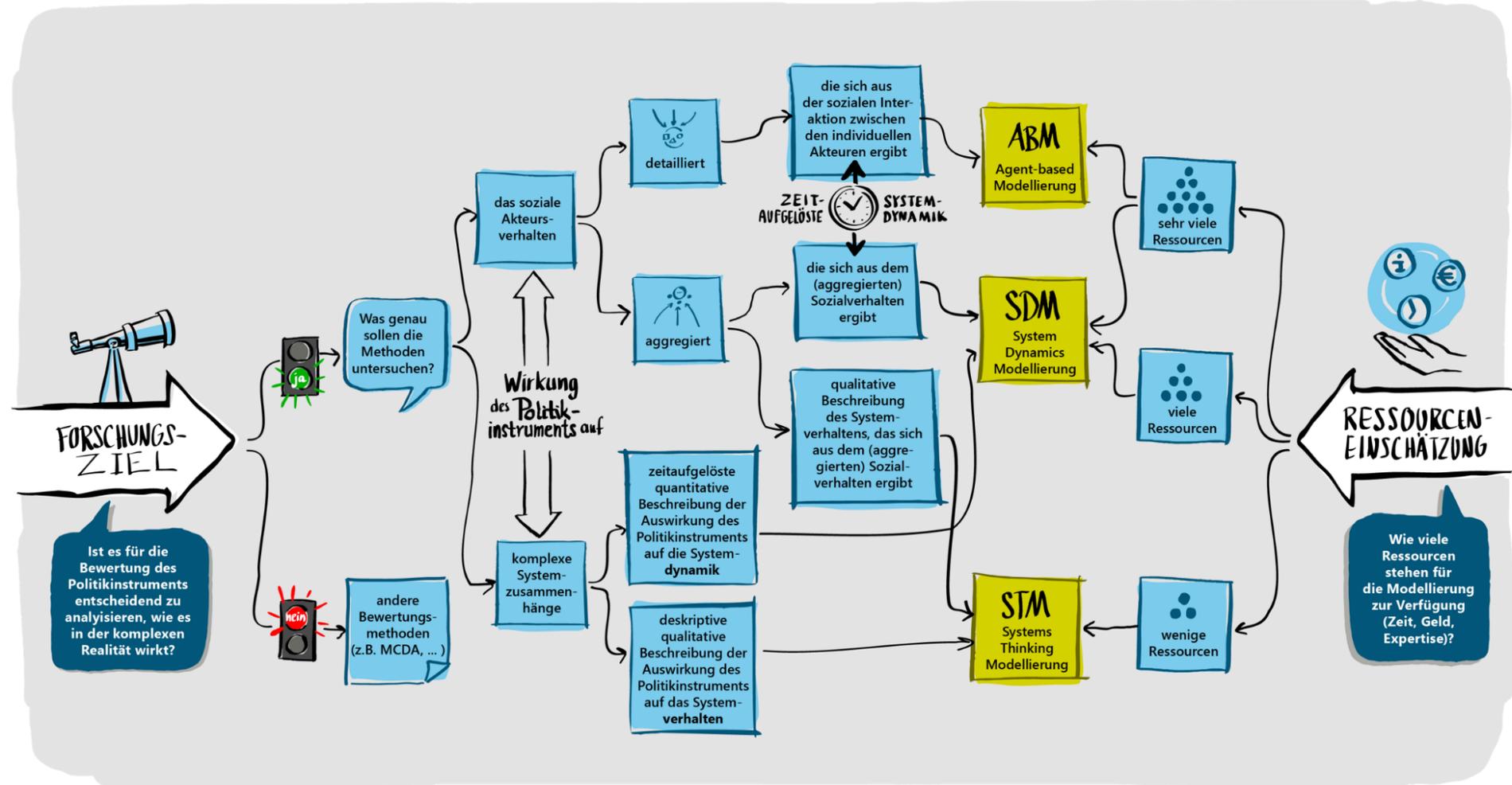
Zusätzlich wurden zwei Visualisierungen speziell für das Factsheet erstellt. Die erste (hier Abbildung 16) beschreibt das Spannungsfeld zwischen Entscheidungsträger\*innen und Modellierer\*innen. Diese stellt vereinfacht Gründe dar weshalb Systemmodelle in der Praxis der Politikberatung bisher nur selten eingesetzt werden. Die Grafik fasst somit im Wesentlichen die Inhalte der Kapitel 4.7 und 4.8 dieses Berichts in leicht überzeichneter Form zusammen. Die zweite Illustration (hier Abbildung 17) zeigt eine Entscheidungshilfe zur Auswahl der geeignetsten Systemmodellierungsmethode (mit Fokus auf die erprobten Ansätzen) in Form eines Entscheidungsbaumdiagramms.

**Abbildung 16: Visualisierung eines beispielhaften Spannungsverhältnisses zwischen den Bedürfnissen von Entscheidungsträger\*innen und Modellierer\*innen bezüglich der Systemmodellierungsmethoden**



Quelle: eigene Darstellung, IÖR. Illustration: Nicolaas Bongaerts, IÖR/Media

Abbildung 17: Entscheidungsbaum als Orientierungshilfe für die Methodenauswahl aus Sicht der Ressourcenabschätzung respektive des Forschungsziels



Quelle: eigene Darstellung, IÖR. Illustration: Nicolaas Bongaerts, IÖR/Media

## 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. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.006>
- Adelle, C., Jordan, A., & Turnpenny, J. (2012). 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. <https://doi.org/10.1068/c11104>
- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. *Theories of Cognitive Self-Regulation*, 50(2), 179–211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Anguelovski, I., Connolly, J. J. T., Cole, H., Garcia-Lamarca, M., Triguero-Mas, M., Baró, F., Martin, N., Conesa, D., Shokry, G., Del Pulgar, C. P., Ramos, L. A., Matheney, A., Gallez, E., Oscilowicz, E., Máñez, J. L., Sarzo, B., Beltrán, M. A., & Minaya, J. M. (2022). Green gentrification in European and North American cities. *Nature Communications*, 13(1), 3816. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31572-1>
- Badham, J. (2010). *A Compendium of Modelling Techniques. (Integration Insights; No. 12)*. The Australian National University, College of Medicine, Biology & Environment. [http://i2s.anu.edu.au/sites/default/files/integration-insights/integration-insight\\_12.pdf](http://i2s.anu.edu.au/sites/default/files/integration-insights/integration-insight_12.pdf)
- Badham, J. M., & Gilbert, N. (2015). TELL ME Design: Protective Behaviour During an Epidemic. *CRESS Working Paper 2015*, Paper (Report) 2. <https://pure.qub.ac.uk/en/publications/tell-me-design-protective-behaviour-during-an-epidemic>
- Bammer, G. (2013). *Disciplining Interdisciplinary: Integration and Implementation Sciences for Researching Complex Real-World Problems* (1st Aufl.). The Australian National University Press. <https://doi.org/10.22459/DI.01.2013>
- Bär, C., Johnsen, L., & Gölz, S. (2023). *Potenzial von Serious Games als Instrument zur Beförderung von Nachhaltigkeit. Eine Betrachtung aus Sicht des Umweltbundesamtes* (Zwischenbericht 80/2023; Texte, S. 42). Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023\\_06\\_05\\_texte-80-2023\\_serious\\_gaming.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023_06_05_texte-80-2023_serious_gaming.pdf)
- Bertoni, E., Fontana, M., Gabrielli, L., Signorelli, S., & Vespe, M. (Hrsg.). (2022). *Mapping the Demand Side of Computational Social Science for Policy. EUR 31017 EN*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/901622>
- Borgstedt, S., & Stockmann, F. (2023). *Gesellschaftliche Trends im urbanen Wandel: Wohnen, Zusammenleben und Partizipation in den Sinus-Milieus* (No. 44). vhw-Schriftenreihe. ISBN 978-3-87941-847-3
- Blum, S., & Schubert, K. (2011). *Politikfeldanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-92097-9>
- Bundesregierung. (2020). *Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimawandel\\_das\\_2\\_fortschrittsbericht\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf)
- Checa, D., & Bustillo, A. (2020). A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. *Multimedia Tools and Applications*, 79(9–10), 5501–5527. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08348-9>
- Destatis. (2023, November 2). *Statistisches Bundesamt Deutschland—GENESIS-Online* [Text]. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>

- 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. <https://doi.org/10.1007/s00146-020-01028-5>
- EEA. (2016). *European Environment Agency. Environment and Climate Policy Evaluation*. (18; EEA Report). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/68508>
- EN-ROADS. (2023, November 27). *EN-ROADS* [Online]. The En-ROADS Climate Solutions Simulator. <https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html?v=23.11.0&lang=de>
- Fuentes, M. A., Tessone, C. J., & Furtado, B. A. (2019). Public Policy Modeling and Applications. *Complexity*, 2019, 1–4. <https://doi.org/10.1155/2019/4128703>
- Giabbanelli, P. J., Voinov, A. A., Castellani, B., & Tornberg, P. (2019). Ideal, Best, and Emerging Practices in Creating Artificial Societies. *2019 Spring Simulation Conference (SpringSim)*, 1–12. <https://doi.org/10.23919/SpringSim.2019.8732881>
- 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), 14. <https://doi.org/10.18564/jasss.3669>
- Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D. L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A. S. A., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J. G., Radchuk, V., Rohwäder, M.-S., Stillman, R. A., Thiele, J. C., & Ayllón, D. (2020). The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(2), Article 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>
- Homer, J. (2019). Best practices in system dynamics modeling, revisited: A practitioner's view. *System Dynamics Review*, 35(2), 177–181. <https://doi.org/10.1002/sdr.1630>
- Homer, J. B. (2012). Partial-model testing as a validation tool for system dynamics (1983). *System Dynamics Review*, 28(3), 281–294. <https://doi.org/10.1002/sdr.1478>
- Hovmand, P. S. (2014). Group Model Building and Community-Based System Dynamics Process. In P. S. Hovmand (Hrsg.), *Community Based System Dynamics* (S. 17–30). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8763-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8763-0_2)
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 47(2), 263. <https://doi.org/10.2307/1914185>
- Kevenhörster, P. (2021). Politikberatung. In U. Andersen, J. Bogumil, S. Marschall, & W. Woyke (Hrsg.), *Handwörterbuch des politischen Systems der Bundesrepublik Deutschland* (S. 720–727). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-23666-3\\_108](https://doi.org/10.1007/978-3-658-23666-3_108)
- 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*, 6, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00112>
- Kolkman, D. (2020). The Usefulness of Algorithmic Models in Policy Making. *Government Information Quarterly*, 37(3), 101488. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101488>
- Mayntz, R. (2009). Speaking Truth to Power: Leitlinien für die Regelung wissenschaftlicher Politikberatung. *dms – der moderne staat – Zeitschrift für Public Policy, Recht und Management*, 2(1), 5–16. <https://doi.org/10.3224/dms.v2i1.01>
- 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. JSTOR. <https://doi.org/10.1007/s11077-008-9071-1>

- Quinton, J., Nesbitt, L., & Sax, D. (2022). How well do we know green gentrification? A systematic review of the methods. *Progress in Human Geography*, 46(4), 960–987.
- Renn, O. (2022). Wissenschaftliche Politikberatung in Zeiten postfaktischer Verunsicherung. In W. Bergem & H. Schöne (Hrsg.), *Wie relevant ist die Politikwissenschaft?* (S. 339–349). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-35414-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-658-35414-5_19)
- Ritchey, T. (2012). Outline for a Morphology of Modelling Methods: Contribution to a General Theory of Modelling. *Acta Morphologica Generalis*, 1(1).
- Rogers, R. (1983). Cognitive and Physiological Processes in Fear Appeals and Attitude Change: A Revised Theory of Protection Motivation. In J. Cacioppo & R. Petty (Hrsg.), *Social Psychophysiology: A Sourcebook*, (S. 153–177). Guilford Press.
- Ruiz Estrada, M., & Yap, S.-F. (2011). The Origins and Evolution of Policy Modeling. *Journal of Policy Modeling*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2011.12.003>
- Scharpf, F. W. (1983). Interessenlage der Adressaten und Spielräume der Implementation bei Anreizprogrammen. In R. Mayntz (Hrsg.), *Implementation politischer Programme II* (S. 99–116). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-93567-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-322-93567-0_5)
- Schlüter, M., Baeza, A., Dressler, G., Frank, K., Groeneveld, J., Jager, W., Janssen, M. A., McAllister, R. R. J., Müller, B., Orach, K., Schwarz, N., & Wijermans, N. (2017). A Framework for Mapping and Comparing Behavioural Theories in Models of Social-Ecological Systems. *Ecological Economics*, 131, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.008>
- 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. *Frontiers in Water*, 3, Art. 686329, 1–19. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.686329>
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>
- Schünemann, C., Herold, H., & Sidorova, A. (2023). *Qualitative und quantitative Modellierungen der Wirksamkeit von Politikinstrumenten. Möglichkeiten und Grenzen der Übertragbarkeit auf das Feld der Anpassung an den Klimawandel.* (Teilbericht 41/2023; Climate Change, S. 87). Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/41\\_2023\\_cc\\_qualitative\\_und\\_quantitative\\_modellierungen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/41_2023_cc_qualitative_und_quantitative_modellierungen.pdf)
- Scott, R. (2018). *Group Model Building. Using Systems Dynamics to Achieve Enduring Agreement.* Springer, Seite 19-83. ISBN : 978-981-10-8958-9
- Seligman, J. S. (2012). Simulation Design for Policy Audiences: Informing Decision in the Face of Uncertainty. In A. Desai (Hrsg.), *Simulation for Policy Inquiry* (S. 17–34). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1665-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1665-4_2)
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1–3), 271–280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)
- Steiner, A. (2009). *System Beratung: Politikberater zwischen Anspruch und Realität* (1. Aufl.). transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839412312>
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.* Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000, Seite 135 - 262. ISBN 0-07-231135-5

- Süsser, D., Ceglaz, A., Gaschnig, H., Stavrakas, 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. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101984>
- Ten Broeke, G., Van Voorn, G., & Ligtenberg, A. (2016). Which Sensitivity Analysis Method Should I Use for My Agent-Based Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(1), 5. <https://doi.org/10.18564/jasss.2857>
- 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. <https://doi.org/10.1080/09640560802423541>
- Belz, J., Follmer, R., Hölscher, J., Stieß, Dr. I., Sunderer, G., Birzle-Harder, B. (2022). Umweltbewusstsein in Deutschland 2020 Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz und Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltbewusstsein-in-deutschland>
- Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., Uijlenhoet, R., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Rangecroft, S., Wanders, N., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2), 89–91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Vennix, J. A. M. (1996). *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. John Wiley & Sons, Seite 101-239. ISBN 0-471-95355-5
- Voinov, A., Jenni, K., Gray, S., Kolagani, N., Glynn, P. D., Bommel, P., Prell, C., Zellner, M., Paolisso, M., Jordan, R., Sterling, E., Schmitt Olabisi, L., Giabbanelli, P. J., Sun, Z., Le Page, C., Elsayah, S., BenDor, T. K., Hubacek, K., Laursen, B. K., majgl, A. (2018a). Tools and Methods in Participatory Modeling: Selecting the Right Tool for the Job. *Environmental Modelling & Software*, 109, 232–255. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.028>
- Voinov, A., Jenni, K., Gray, S., Kolagani, N., Glynn, P. D., Bommel, P., Prell, C., Zellner, M., Paolisso, M., Jordan, R., Sterling, E., Schmitt Olabisi, L., Giabbanelli, P. J., Sun, Z., Le Page, C., Elsayah, S., BenDor, T. K., Hubacek, K., Laursen, B. K., Smajgl, A. (2018b). Tools and Methods in Participatory Modeling: Selecting the Right Tool for the Job. *Environmental Modelling & Software*, 109, 232–255. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.028>
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press.
- Walz, R. (2019). Politikberatung im Kontext Nachhaltigkeit. In M. A. Weissenberger-Eibl (Hrsg.), *Zukunftsvision Deutschland* (S. 195–213). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-58794-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-58794-2_10)