

Agentenbasierte Modelle & Komplexitätsökonomik

Eine kurze Einführung

26.01.2023, Ringvorlesung Plurale Ökonomik Siegen

Prof. Dr. Claudius Gräbner-Radkowitsch

Europa-Universität Flensburg & Institut für die Gesamtanalyse der Wirtschaft (JKU Linz)

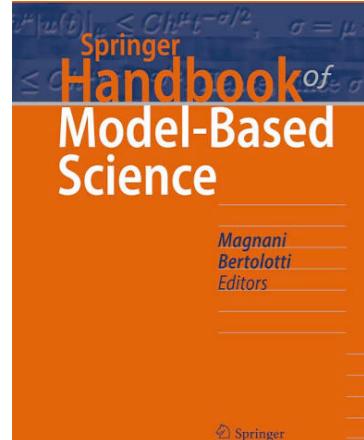
www.claudius-graeber.com | @ClaudiusGraebner | claudius@claudius-graeber.com

Überblick

- Meta-theoretische Rahmung: Modelle und Erklärung
- Agentenbasierte Modelle in Abgrenzung zu anderen Modellen
- Agentenbasierte Modelle und Komplexitätsökonomik
- Agentenbasierte Modelle: ein konzeptioneller Überblick
- Diskussion und Ausblick

Modelle und ihre Erklärung

Recap: Zur Rolle von Modellen



- In vielen Disziplinen Modelle immer mehr zentrales Instrument der Forschung

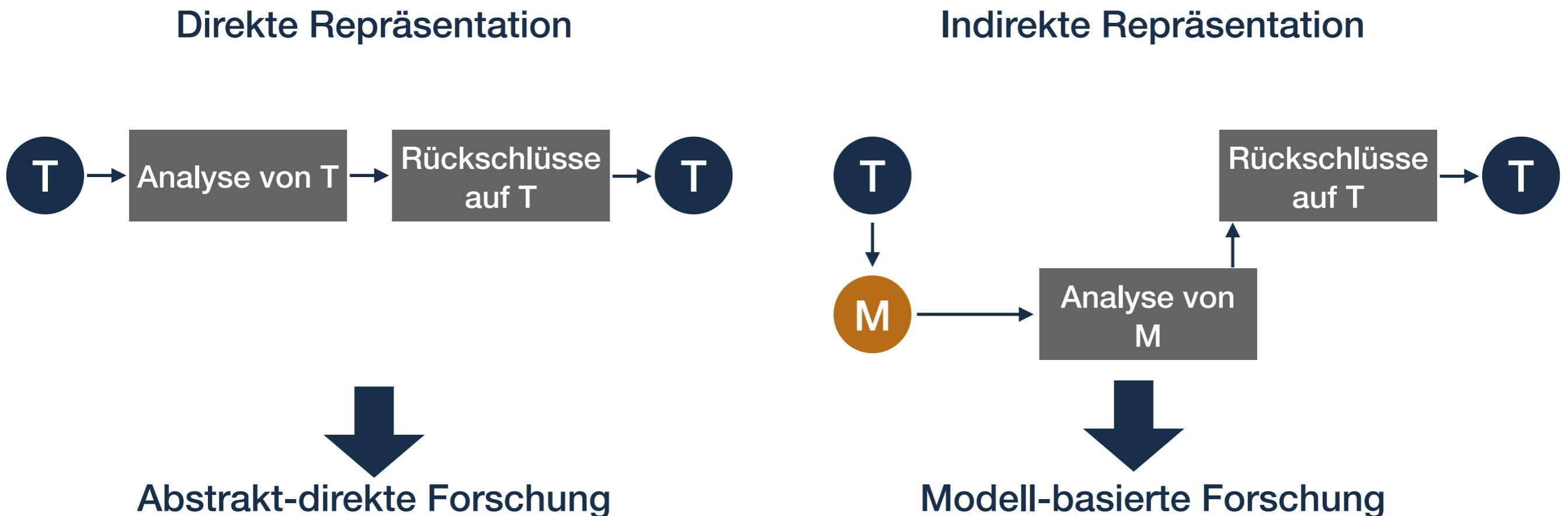
“ Every analysis is a model.”
Kenneth Arrow (Ökonom)



- In anderen Disziplinen große Skepsis gegenüber der Anwendung von Modellen → gleiches gilt für unterschiedliche Paradigmen
- Einstellung gegenüber Modellen als Teil des epistemologischen Kerns eines Paradigmas

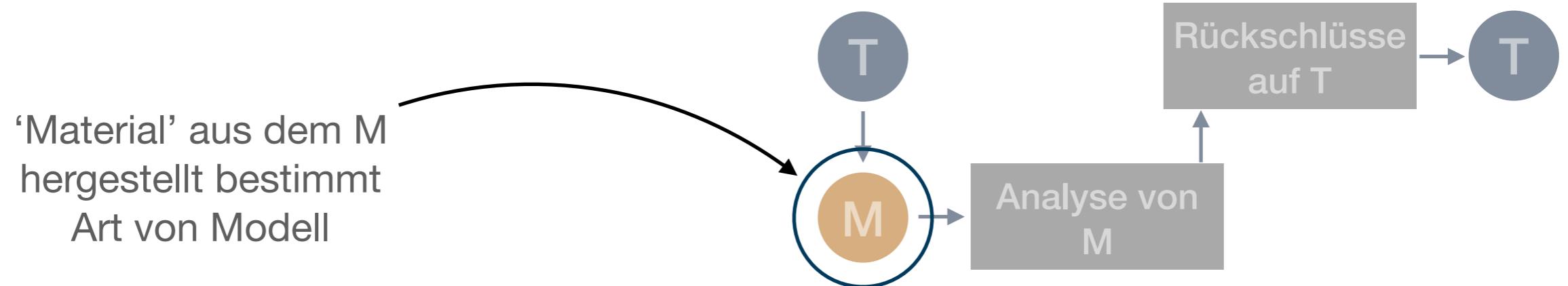
Recap: Modelle und ihre Alternativen

- Während ihrer Analyse **repräsentieren** Forscher:innen ihr **Zielsystem**
- Dabei wird zwischen zwei unterschiedlichen Praktiken unterschieden:



Modelle und ihre Alternativen

- Bei der modell-basierten Forschung wird zunächst ein **Surrogat** für das Zielsystem kreiert
 - In einem nächsten Schritt wird dann das Surrogat untersucht
 - Daraus werden dann Rückschlüsse auf das Zielsystem abgeleitet
 - Begründung: Realität als ganze nicht verstehbar → Surrogat notwendig



Arten von Modellen

Konkrete Modelle

Bestehen aus: phys. Material
Beschrieben durch: Wörter



Mathematische Modelle

Bestehen aus: math. Objekten
Beschrieben durch: Formeln

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \Rightarrow c^T \\ \bar{x}_2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \Rightarrow \text{Var}(x) \\ \sqrt{(S_1, S_2)} &= \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \Rightarrow \text{SD}(x) \\ (x) &= g(x)/a(x), \quad S(x) = \sin(x)/a(x) - \sin(\bar{x})/a(\bar{x}) \\ f(x)/g(x) &= (\pi/4)^2 \cdot \frac{\sin(x)/a(x) - \sin(\bar{x})/a(\bar{x})}{\sin(x)/a(x)} \Rightarrow \text{Corr}(x) \\ (S_1, S_2) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \Rightarrow \text{Cov}(x) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 &= n \cdot \text{Var}(x) \Rightarrow \text{SD}(x) = \sqrt{n} \cdot \text{SD}(x) \end{aligned}$$

Algorithmische Modelle

Bestehen aus: Prozeduren
Beschrieben durch: Wörter/Code



- Je nach Material können Modelle unterschiedliche Dinge gut oder schlecht repräsentieren
 - **Repräsentative Kapazitäten**
 - Die Präferenz für bestimmte Modellarten Teil des Kern eines Paradigmas
 - Wegen unterschiedlicher repräsentativer Kapazitäten Potenzial für Triangulation → **Modell-Pluralismus**

Arten von Modellen

Konkrete Modelle



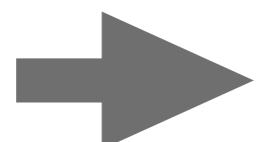
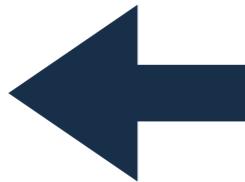
Mathematische Modelle

$$\begin{aligned}
& \text{Simplifying:} \\
& \frac{d}{dt} \tilde{S}_1 = \frac{d}{dt} \tilde{S}_2 = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n x_k^2 \Rightarrow d \\
& \tilde{x}_1 = \frac{d}{dt} \tilde{S}_1 = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n x_k^2 = \sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k' \\
& \Rightarrow (\tilde{S}_1, \tilde{S}_2) \cup (\tilde{S}_1, S_2) = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n x_k^2 \\
& (\tilde{x}_1)' = d[x]/dt \\
& S(t) = \sin(\sqrt{\lambda} t) = p(x) - \sin(\sqrt{\lambda} t) \cos(\sqrt{\lambda} t) \\
& f(x), g(x) = (f'(x))^2 + g'(x)^2 = \frac{\cos^2(\sqrt{\lambda} t)}{1-\sin^2(\sqrt{\lambda} t)} = \frac{1}{\cos^2(\sqrt{\lambda} t)} = \frac{1}{1-S^2(t)} \\
& (\tilde{S}_1, K(\tilde{S}_1)) \cup (\tilde{S}_1, S_2) \cup (\tilde{S}_2, K(\tilde{S}_2)) \cup (\tilde{S}_2, S_2) \\
& \quad \vdash \text{Graph: } \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \\
& X \sum_{k=1}^n \left(x_k^2 \right) \xrightarrow{\text{Graph}} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \\
& \Rightarrow d \int x^2 dx = T(x) = \int dt = \int dt \\
& \text{Solve for } x, \quad x = 15 \Rightarrow 3 = q \\
& S(t) = \sin(\sqrt{\lambda} t) = p(x) - \sin(\sqrt{\lambda} t) \cos(\sqrt{\lambda} t)
\end{aligned}$$

Algorithmische Modelle

- Als algorithmische Modelle ist der epistemische Kern von ABM ein Set an Prozeduren und Software-Objekten → **Objekte** und **Mechanismen**
 - Fokus auf **Generation** von Dynamiken, nicht Charakterisierung von Gleichgewichten
 - Simulation über Computer: große repräsentative Kapazitäten, aber auch: epistemische Verdecktheit ('**epistemic opacity**')

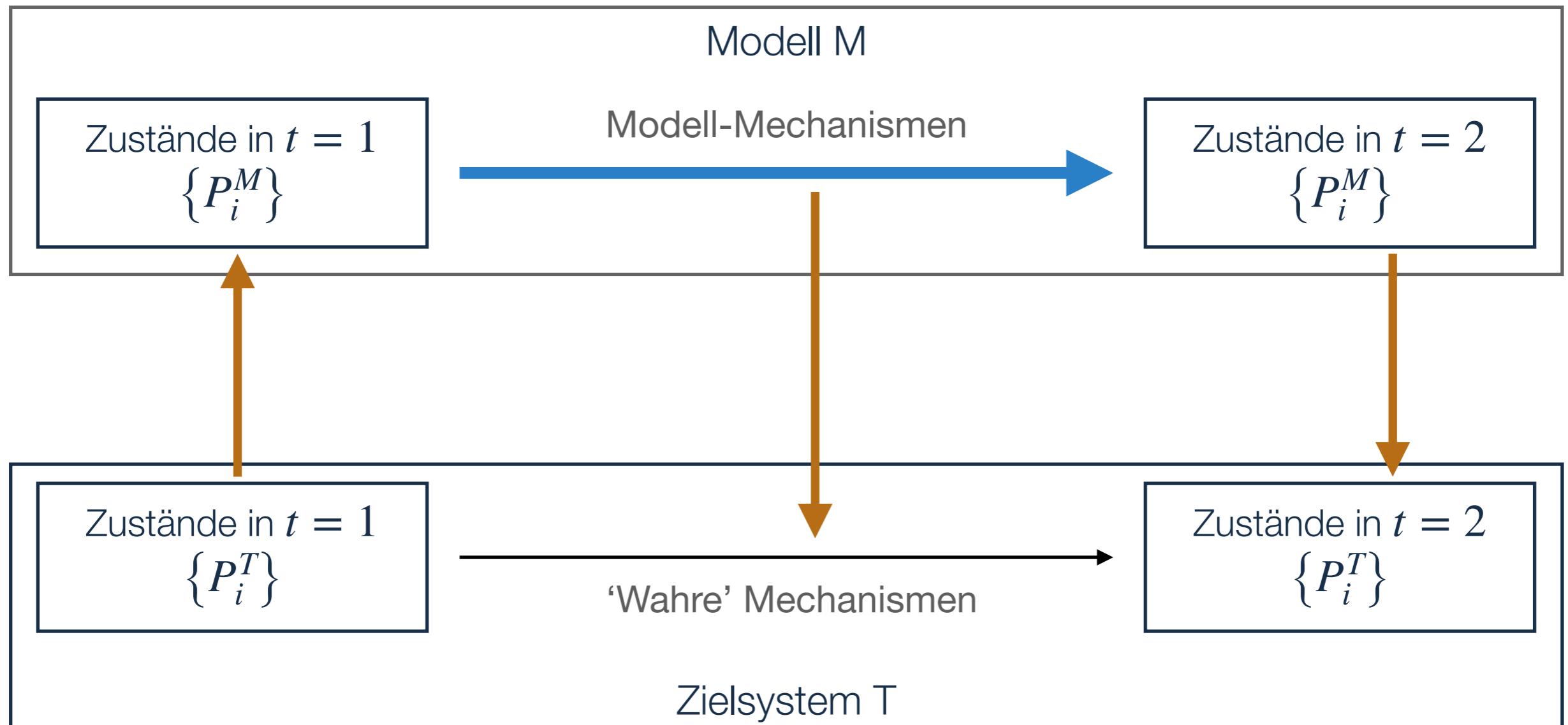
Wie Modelle repräsentieren



Für Interessierte: siehe *further readings*.

Die Evaluation von Modellen

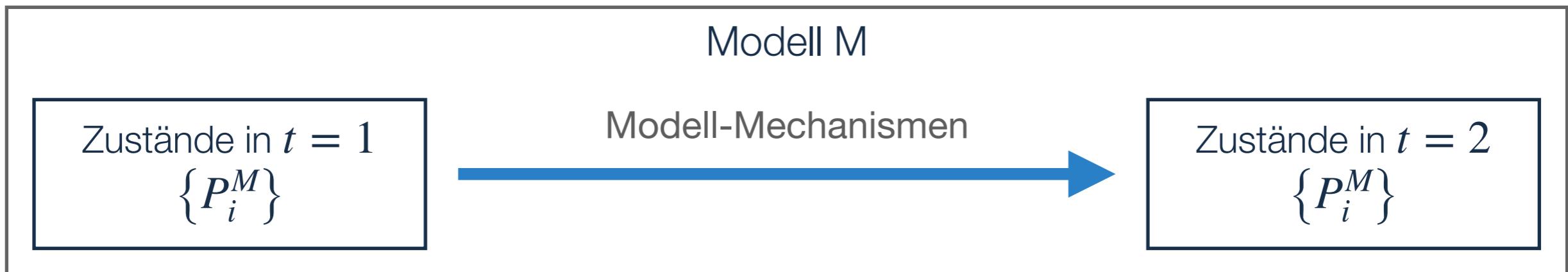
Verifikation vs. Validierung



- **Verifikation:** testen ob das Modell tut was es soll → kein Bezug zum Ziel
- **Validierung:** testen ob das Modell das Zielsystem 'gut' (genug) repräsentiert

Die Evaluation von Modellen

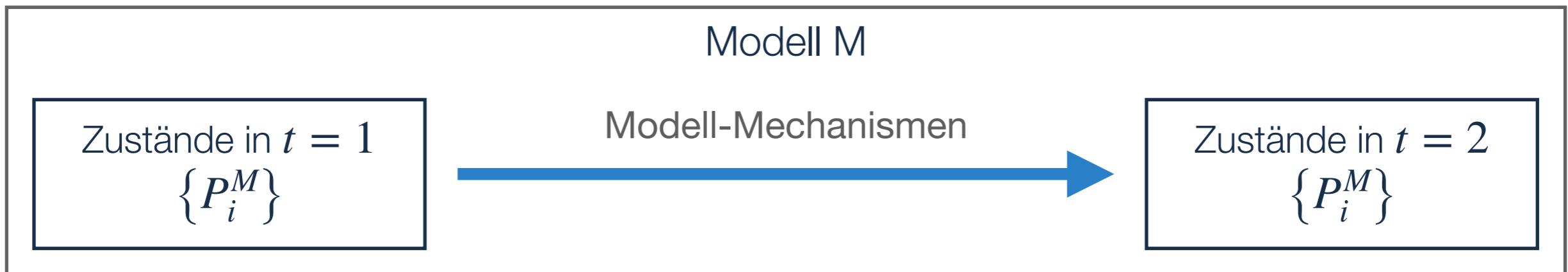
Verifikation



- Bei der Verifikation wird überprüft ob das Modell funktioniert wie es soll
- Bei mathematischen Modellen: Simulation oder Beweis
- Bei algorithmischen Modellen: Simulation
- Verifikation bei nicht-formalen Modellen unsicherer
- Je transparenter und simpler desto Modell, desto einfacher die Verifikation

Die Evaluation von Modellen

Verifikation

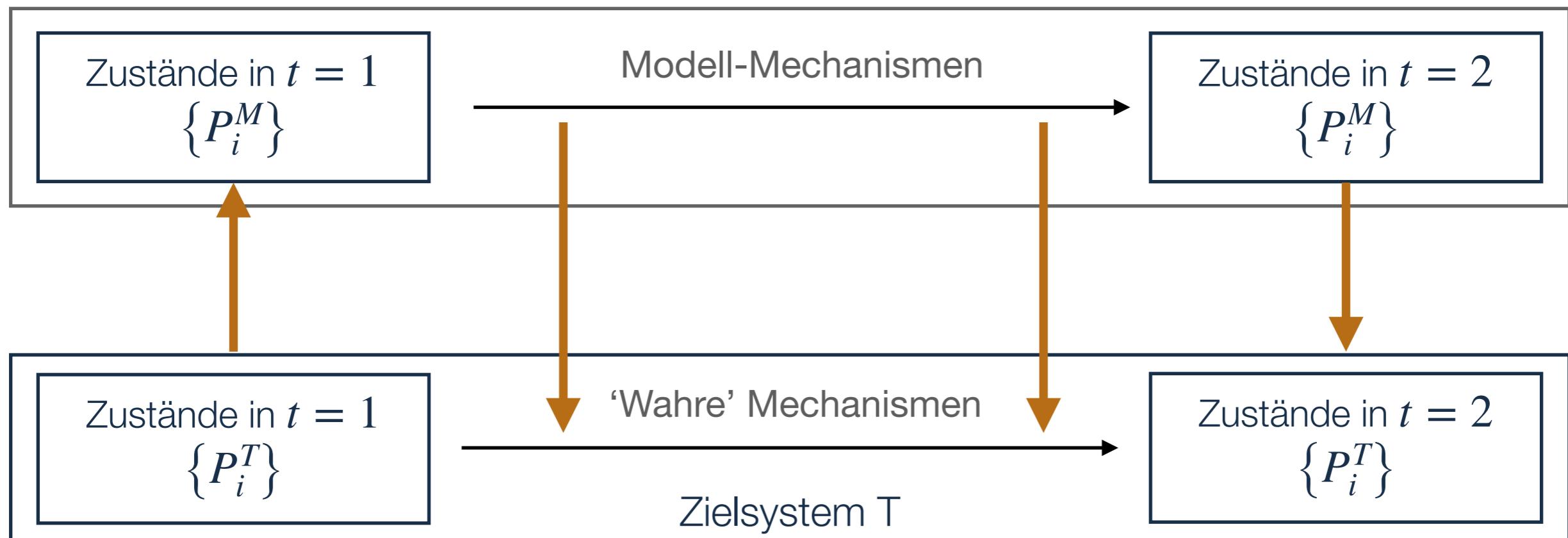


“ As is often the case, confirming that the model was correctly programmed was substantially **more work** than programming the model in the first place.

Robert Axelrod (1997)

Die Evaluation von Modellen

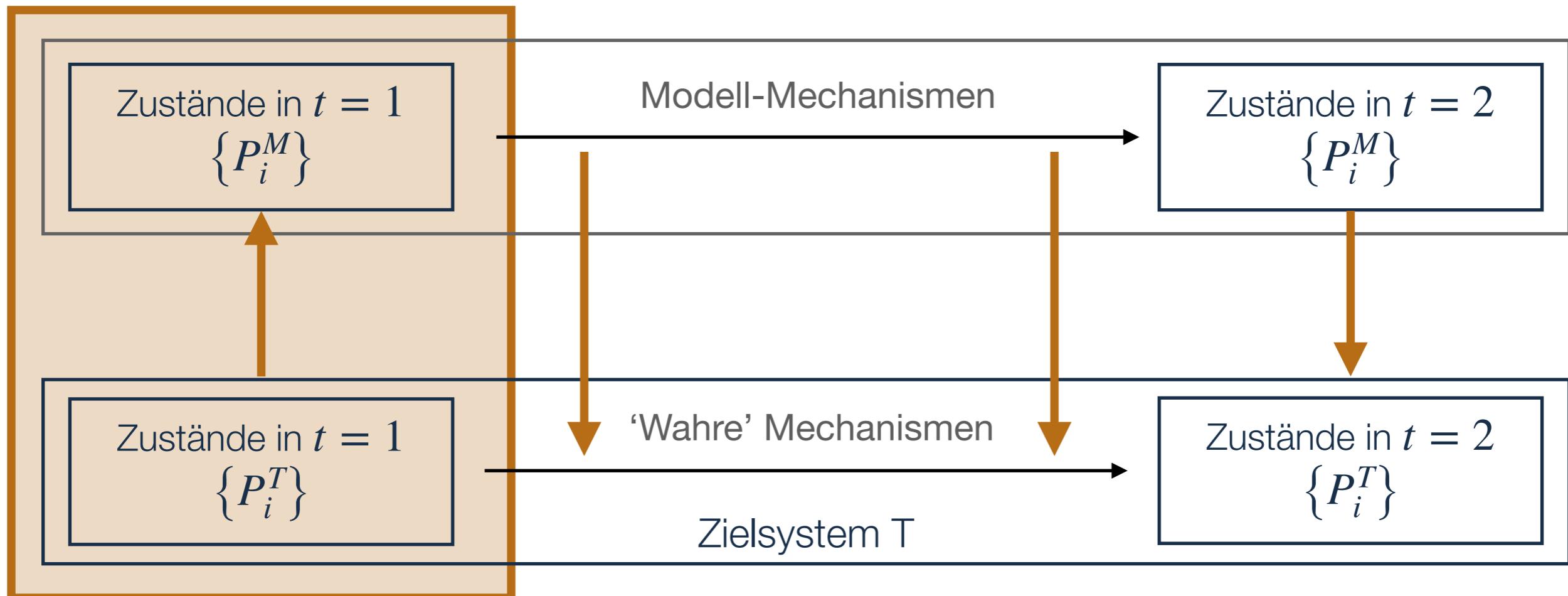
Validierung: vier Alternativen



- In der Validierung wird der Fit zwischen Modell und Zielsystem überprüft
 1. Input-Validierung
 2. Prozess-Validierung
 3. Deskriptive Output-Validierung
 4. Vorhersagende Output-Validierung

Die Evaluation von Modellen

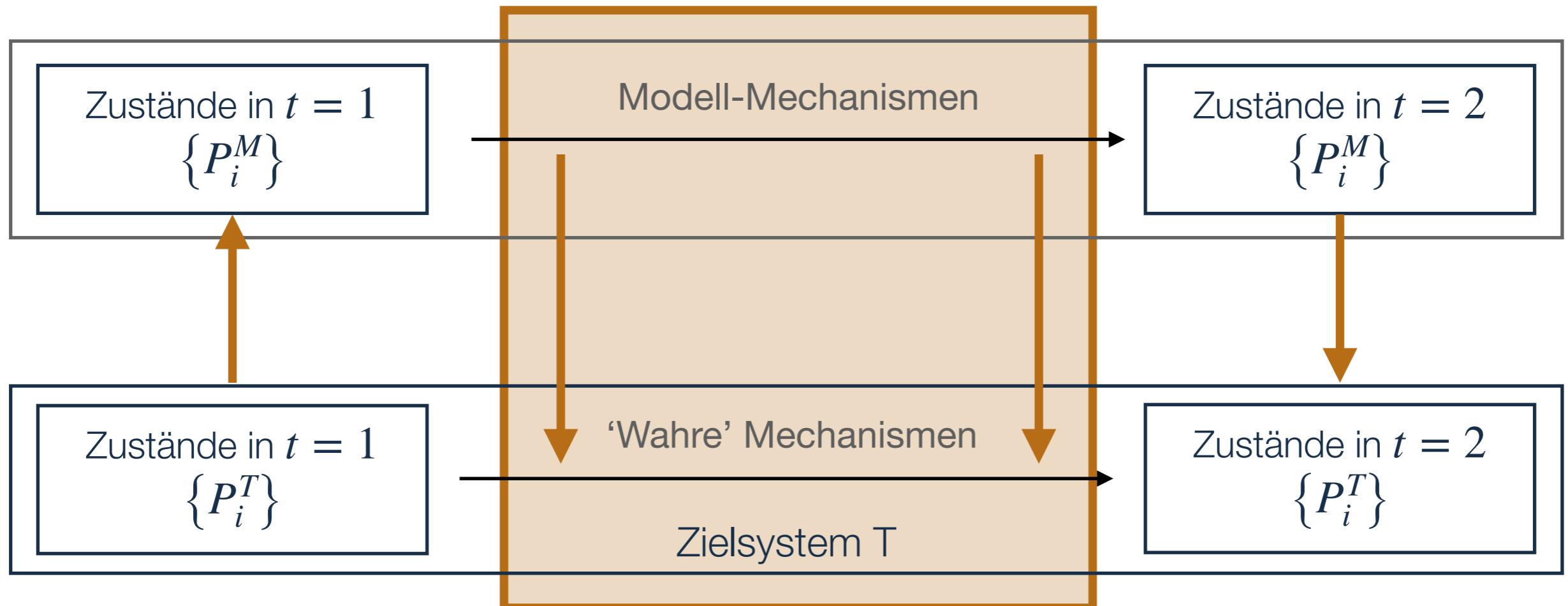
Validierung: vier Alternativen



- Input-Validierung fragt nach dem Ausgangsfit
 - Machen die Zustandsvariablen Sinn?
 - Wurden alle essenziellen Teile des Zielsystems abgebildet?
 - Leichter für komplexe Modelle

Die Evaluation von Modellen

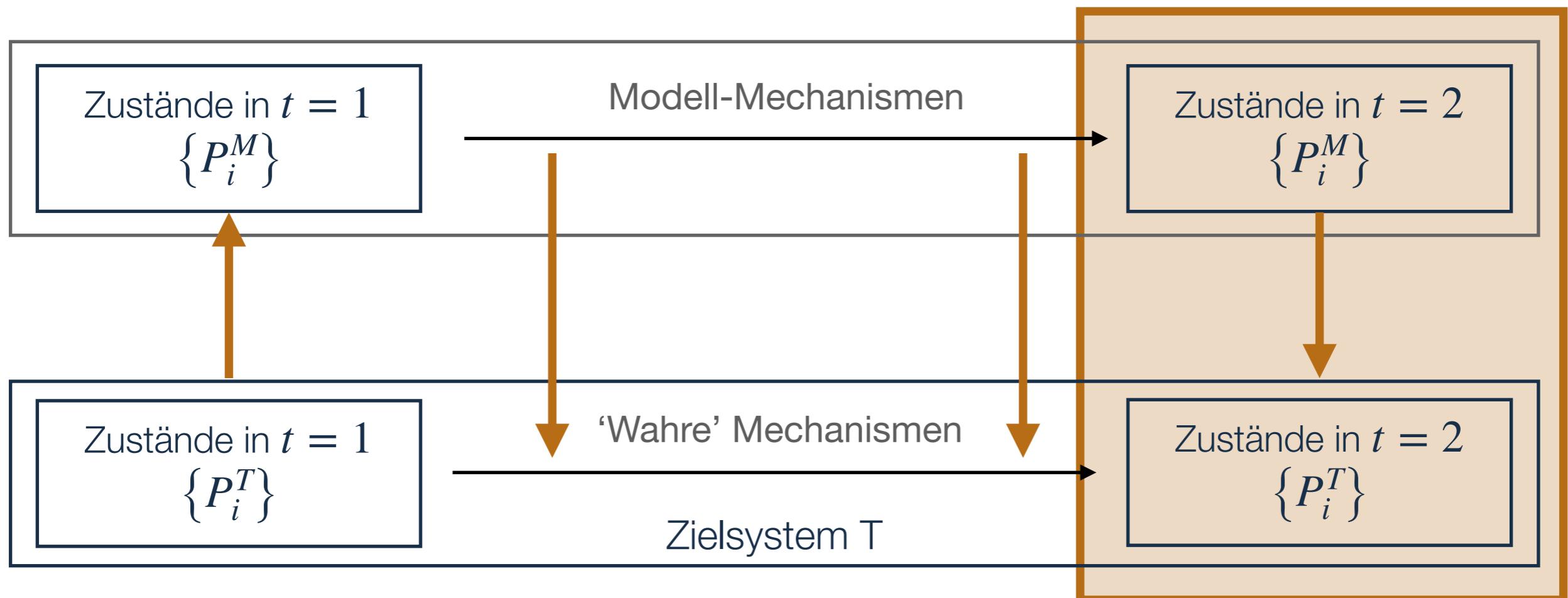
Validierung: vier Alternativen



- Prozess-Validierung fragt nach der Plausibilität der Mechanismen?
 - Sind alle relevanten Mechanismen abgebildet?
 - Funktionieren die Mechanismen wie in der Realität? → Unsicher, weil unbeobachtbar
 - Leichter für algorithmische Modelle mit modularem Design

Die Evaluation von Modellen

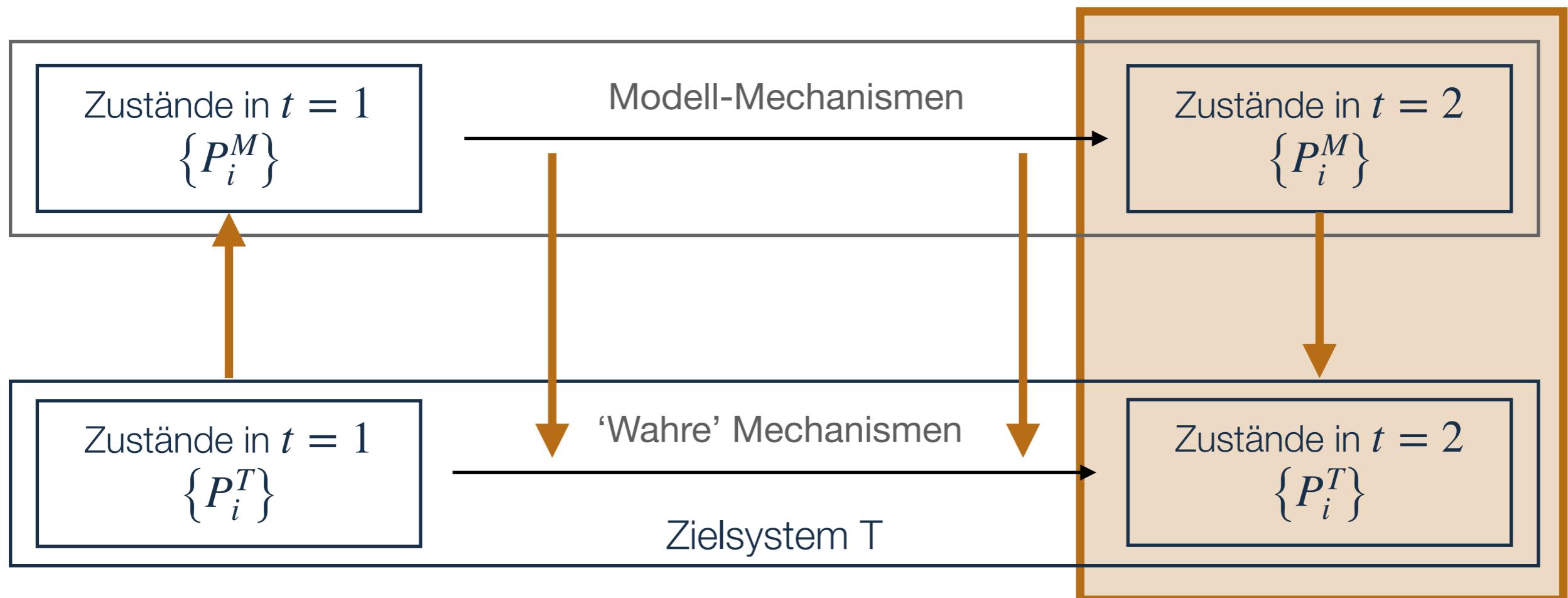
Validierung: vier Alternativen



- Deskriptive Output-Validierung fragt nach Passung zu vergangenen Daten
 - Können empirische Daten repliziert werden?
 - Mögliches Problem: **Equifinalität**
 - Leichter für komplexe Modelle → Problem des **Overfittings**

Die Evaluation von Modellen

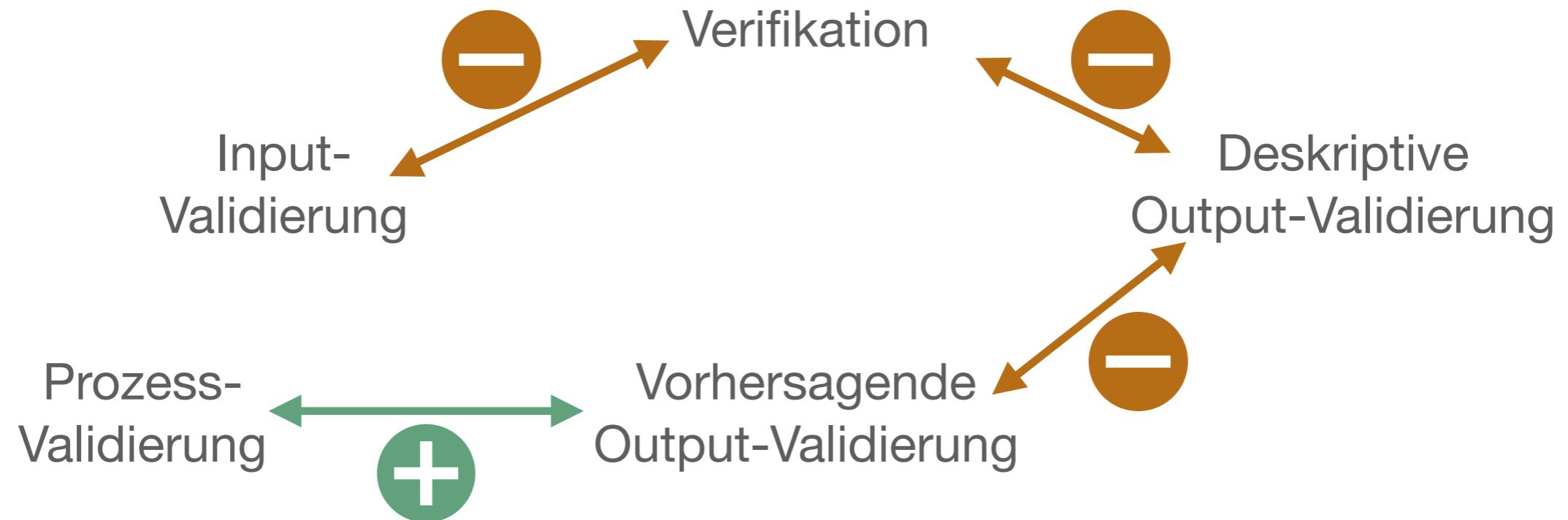
Validierung: vier Alternativen



- Vorhersagende Output-Validierung fragt nach Fähigkeit der Vorhersage
 - Können zukünftige Zustände des Zielsystems vorhergesagt werden?
 - Vorgehen: Trainings- und Testdatensätze
 - Leichter für simple Modelle

Trade-Offs und Modell-Pluralismus

- Aufgrund von Trade-Offs gibt es das perfekte Modell nicht



Trade-Offs und Modell-Pluralismus

- Aufgrund von Trade-Offs gibt es das perfekte Modell nicht
- Zentrale Frage: für was soll ein Modell verwendet werden → **Construal**
 - Angestrebter Geltungsbereich (**scope**) - wofür soll das Modell gelten?
 - Gewünschte Zuweisungen (**assignment**) - welche Teile des Modells sind wichtig?
 - Angestrebte **dynamische Angemessenheit** - wie gut soll das Modell zu Daten passen?
 - Angestrebte **mechanistische Adäquanz** - wie gut soll das Modell Mechanismen repräsentieren?
- Innerhalb von Paradigmen gibt es Präferenzen für bestimmte Modelle und Validierungsarten (bzw. für oder gegen das Modellieren allgemein)
- Insgesamt besteht hier aber viel Potenzial für **Triangulation** mehrerer Modelle
 - Unterschiedliche Arten mit unterschiedlichen repräsentativen Kapazitäten
→ **Pluralismus**

Der besondere Platz von ABM

- Es gibt sehr unterschiedliche Typen von ABM
 - Eher **simple** Modelle zur Illustration bestimmter Mechanismen
 - Beispiel: Schelling's Seggregationsmodell
 - Extrem **komplexe** Modelle für Vorhersagen/Szenarioanalyse
 - Beispiel: EURACE Modelle der Europäischen Union
- Unterschiedliche Ausprägung der ABM-spezifischen Vor- und Nachteile
- Qualitativ andere Art der Erklärung ökonomische Phänomene als gleichgewichtsbasierte Modelle
 - Aber: **Triangulation** durchaus möglich

Comput Econ (2019) 53:763–782
<https://doi.org/10.1007/s10614-017-9763-8>  CrossMark

Getting the Best of Both Worlds? Developing Complementary Equation-Based and Agent-Based Models

Claudius Gräßner¹  · Catherine S. E. Bale² · Bernardo Alves Furtado³  ·
Brais Alvarez-Pereira⁴ · James E. Gentile⁵ · Heath Henderson⁶ ·
Francesca Lipari⁷

ABM und Komplexität

ABM und Komplexitätsökonomik

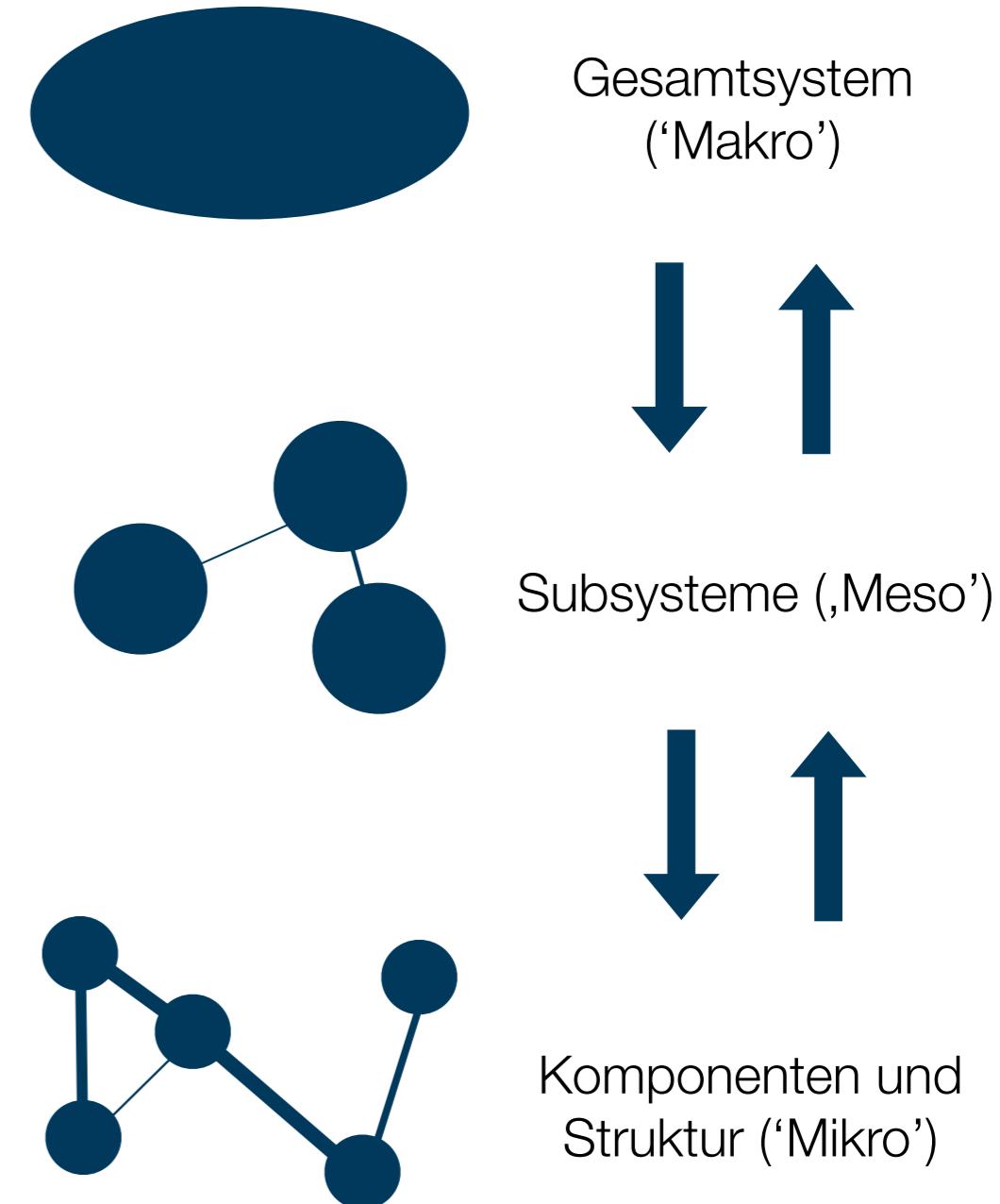
- ABM werden häufig mit dem Paradigma der Komplexitätsökonomik in Verbindung gebracht
- Grund: ontologischer Ausgangspunkt der Komplexitätsökonomik legt Anwendung von ABM nahe
 - Zur Berücksichtigung der **essenziellen Eigenschaften** komplexer Systeme bieten sich ABM an
 - Komplexitätsansatz “belohnt” Stärken, “vergibt” Schwächen (\neq Neoklassik)

Ein ökonomisches System ist **komplex**, wenn es aus einer Menge **potenziell heterogener** und **potenziell adaptiver** Komponenten besteht, und die Relationen und **Interaktionen** zwischen diesen Komponenten derart sind, dass sich ein **systemisches Ganzes** ergibt.

Ontologie der Komplexitätsökonomik

Systemismus und eine geschichtete Ontologie

- Zentrale Bedeutung von Objekten und Mechanismen
- **Aggregation** und **Emergenz** als zentrale Problemstellungen
- Gleichzeitige Relevanz von bottom-up und top-down-Effekten
 - **reconstitutive downward effects**
- ABM geeignet die essenziellen Eigenschaften komplexer Systeme direkt abzubilden
- Gut zur Identifikation generativer Mechanismen und (**endogener**) **Ungleichgewichtsdynamiken** geeignet



ABM: ein konzeptioneller Überblick

Zentrale Schritte der Modell-Konstruktion

1. Spezifizierung des **Zielsystems** und Modell-Construals →
 - bestimmt Agententypen, (endogene sowie exogene) Variablen des Modells sowie Interaktionsprotokolle
2. Formulierung der zugrundeliegenden **Theorie** in formale Sprache
3. Übersetzung in Computer-**Code**
4. **Verifizierung** der Implementierung des Modells
5. **Parametrisierung** (Kalibrierung oder Schätzung) des Modells
6. Durchführung künstlicher **Experimente** und **Interpretation** des Modells

Im Folgenden: Bausteile moderner (Makro-)ABM, Beispiele in further readings

Zentrale Bestandteile makroökonomischer ABM

- Kein allseits geteilter theoretischer Kern → Ko-Existenz verschiedener ABM-‘Familien’
 - Kein Konsens über Entscheidungs-Algorithmen oder Interaktionsprotokolle (\neq DSGE)
- Die folgenden Typen von Agenten finden sich regelmäßig in MABM:

Haushalte

Banken

Firmen

Regierung

Zentralbank

- Gängige Unterscheidung: small-, medium- und large-scale ABM
- Je nach Fokus: ABM für die **kurze oder Frist** oder integrative ABM für die kurze und lange Frist, bzw. **Single- oder Multi-Country-ABM**

Zentrale Bestandteile von MABM

Haushalte - Übersicht

- Haushalte...
 - ...bieten auf dem Arbeitsmarkt ihre **Arbeitskraft** den Firmen an
 - ...**besitzen** die Firmen → erhalten Dividenden
 - ...**kaufen** Konsumgüter
 - ...**sparen** Einkommen, das nicht für Konsum ausgegeben wird wird auf Girokonten (oder kaufen andere finanzielle Assets → Vermögen)
- Beispiel: Wonach bestimmt sich Nachfrage nach Konsumgütern? (≠DSGE: Intertemporale Optimierung)
- In der Regel zweischrittiges Verfahren:
 - Wie viel Geld steht für Konsum zur Verfügung?
 - Für was genau wird dieses Budget ausgegeben?

Zentrale Bestandteile von MABM

Haushalte - Bestimmung des Konsum-Budgets

- Hier: Beispiele für einen möglichen Entscheidungsalgorithmus → further readings
- Häufig modelliert man Konsum als lineare Funktion des Vermögens:

$$C_{h,t} = c_h W_{h,t}^h + c_f W_{h,t}^f$$

Humankapital/
reale Assets

Konsumneigung

Finanzielles Vermögen

- Dynamik des Vermögens:

$$W_{h,t}^f = \hat{R}W_{h,t-1}^f + Y_{h,t} - C_{h,t}$$

- Ersparnisse korrespondieren zur Differenz von finanziellem Vermögen:

$$S_{h,t} = W_{h,t}^f - W_{h,t-1}^f$$

Zentrale Bestandteile von MABM

Haushalte - Bestimmung des Konsum-Budgets

- In manchen Modellen gibt es keine Vermögensakkumulation:

$$C_{h,t} = Y_{h,t}$$

- Eine experimentell gut fundierte Variante definiert ein Vermögen-zu-Einkommens-Verhältnis ω^f und eine Anpassungsgeschwindigkeit v :

$$S_{h,t} = v \left(\omega^f Y_{h,t} - W_{h,t}^f \right)$$

- Daraus ergibt sich folgendes Konsum-Budget:

$$C_{h,t} = (1 - v\omega^f) Y_{h,t} + vW_{h,t}^f$$

- Dieses Vorgehen wird in vielen Modellen noch erweitert um Aspekte wie Konsumentenstimmung oder Beschäftigungsstatus
 - Beispiel für Orientierung an Mikro-Evidenz

Zentrale Bestandteile von MABM

Haushalte - Bestimmung der zu konsumierenden Güter

- Wenn es heterogene Konsumgüter gibt, dann entscheiden Konsument:innen in der Regel zufällig
- Für die Wahrscheinlichkeit gilt z.B.

$$\mathbb{P} [h \text{ kauft Gut } i] = \frac{\exp(-\gamma \log P_{i,t})}{\sum_j \exp(-\gamma \log P_{j,t})}$$

- Wobei γ ein Parameter für die Intensität des Preiswettbewerbs darstellt
 - Auch hier gibt es zahlreiche Ergänzungen, z.B. Präferenz für Güter aus der Heimatregion
 - Auch diese Formulierung stützt sich auf empirische Mikro-Evidenz aus der Marketing-Literatur

Gesamtwirtschaftliches ABM

- Auf ähnliche Art und Weise werden alle weiteren Aspekte des Modells implementiert
 - Bestimmung des Arbeitsangebots
 - Nachfrage nach finanziellen Assets
 - Firmen: Angebot and Konsum
 - Firmen: Angebot und Nachfrage nach Kapitalgütern
 - Firmen: Innovationsverhalten und Nachfrage nach Arbeit/Krediten
 - Banken: Zinssatz und Kreditvergabe
 - Staat und Zentralbanken
 - ...

Interaktion in makroökonomischen ABM

	Haushalte	Firmen	Banken
Konsumgüter	Nachfrager	Anbieter	
Kapitalgüter		Anbieter & Nachfrager	
Arbeit	Anbieter	Nachfrager	
Kredite		Nachfrager	Anbieter
Assets	Nachfrager		Anbieter

Darüber hinaus gibt es noch die Regierung und die Zentralbank, sowie je nach Modell weitere spezielle Märkte oder Agentenklassen

Abschließende Kommentare

- ABM weisen zahlreiche Freiheitsgrade aus
 - Unterschiedliche Bereiche häufig sehr unterschiedlich komplex modelliert
- Je nach Fragestellung und Fokus des Modells, z.B.:
 - Regulierung von Finanzmärkten und Rolle finanzieller Instabilität
 - Technologischer Wandel, Innovation und Wachstum
 - Experimentallabor für Fiskal- oder Geldpolitik
 - Ökonomische Bedeutung sozialer Dynamiken wie Lernen, Nachahmung, Einfluss, etc.
 - Auch: Simulation von “Utopien” (siehe Readings von Scholz-Wäckerle/Gerdes et al.)
- Insgesamt ist es ein sehr vielfältiges Feld mit weniger Standards als in der DSGE Literatur
- Da das Feld recht jung ist bleiben viele Fragen noch unbearbeitet

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

- Modelle repräsentieren ein Zielsystem zum Zwecke der Wissensgeneration
- Material des Modells bestimmt Art und damit repräsentative Kapazitäten
- Agentenbasierte Modelle sind algorithmischen Modelle → Fokus auf Prozessen
- Gut geeignet um essenzielle Eigenschaften komplexer Systeme abzubilden
- Nachteil: relativ hohe Freiheitsgrade, wenig “Disziplinierung”
 - Relativer Nachteil bei Modell-Verifizierung
 - Dafür: Stärke bei mechanismen-basierter und dynamischer Erklärung
- V.a. makroökonomische ABM werden prominenter, aber bleiben ein ‘heterodoxes’ Modellierungsinstrument mit vielen Anwendungsmöglichkeiten

Further readings

- Meta-Theorie von ABM, ins. Verifizierung/Validierung: Gräßner (2018)
- Konzeptionelle Beschreibung aus Komplexitätsperspektive: Arthur (2021)
- Triangulation mit anderen Modellklassen: Gräßner et al. (2019)
- ABM, Computerspiele und Transformation: Gerdes et al. (2021)
- Review zu aktuellen Makro-ABM: David & Delli-Gatti (2018)
- Stock-Flow-Konsistentes ABM: Caiani et al. (2016)
- Polit-Ökonomisches ABM: Rengs & Scholz-Wäckerle (2018)
- ABM zu Analyse globaler Institutionen: Gerdes et al. (2022)
- ABM zur Analyse von Klima-Politikmaßnahmen: Rengs et al. (2020)

Online-Vorlesung zu Makro-ABM:
<https://graebnerc.github.io/macroeconomics/>

Referenzen

- Arthur, W. B. (2021). Foundations of complexity economics. *Nature Reviews Physics*, 3(2), 136–145. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00273-3>
- Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Gallegati, M., Kinsella, S., & Stiglitz, J. E. (2016). Agent based-stock flow consistent macroeconomics: Towards a benchmark model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 69, 375–408. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2016.06.001>
- Dawid, H., & Delli-Gatti, D. (2018). Agent-Based Macroeconomics. In C. Hommes & Blake LeBaron (Eds.), *Handbook of Computational Economics* (pp. 63--156). Springer.
- Gräßner, C. (2018). How to Relate Models to Reality? An Epistemological Framework for the Validation and Verification of Computational Models. *Journal of Artificial Societies and Simulation*, 21(3). <https://doi.org/10.18564/jasss.3772>
- Gräßner, C., Bale, C. S. E., Furtado, B. A., Pereira, B. Á., Gentile, J. E., Henderson, H., & Lipari, F. (2019). Getting the Best of Both Worlds? Developing Complementary Equation-Based and Agent-Based Models. *Computational Economics*, 53(2), 763–782. <https://doi.org/10.1007/s10614-017-9763-8>
- Gerdes, L., Scholz-Wäckerle, M., & Schröter, J. (2021). Computerspiele und ökonomische Modellformen Auf dem Weg zu transformationskritischen Medien. *Zeitschrift Für Medienwissenschaft*, 13(25–2), 35–44. <https://doi.org/10.14361/zfmw-2021-130205>
- Gerdes, L., Rengs, B., & Scholz-Wäckerle, M. (2022). Labor and environment in global value chains: an evolutionary policy study with a three-sector and two-region agent-based macroeconomic model. *Journal of Evolutionary Economics*, 32(1), 123–173. <https://doi.org/10.1007/s00191-021-00750-7>
- Rengs, B., & Scholz-Wäckerle, M. (2018). Consumption & class in evolutionary macroeconomics. *Journal of Evolutionary Economics*, 29(1), 229–263. <https://doi.org/10.1007/s00191-018-0592-2>
- Rengs, B., Scholz-Wäckerle, M., & Bergh, J. van den. (2020). Evolutionary macroeconomic assessment of employment and innovation impacts of climate policy packages. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 169, 332–368. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2019.11.025>