



UNIVERSITÄT
LEIPZIG

Leipzig Data Week 2024

WILL IT SPREAD OR NOT? AGENTEN-BASIERTE MODELIERUNG NACHHALTIGER ENERGIETECHNOLOGIEN

Leipzig Data Week 2024, 16/April/2024, Leipzig

Simon Johanning

Lehrstuhl für Energiemanagement & Nachhaltigkeit
Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Uni Leipzig

TEIL I:

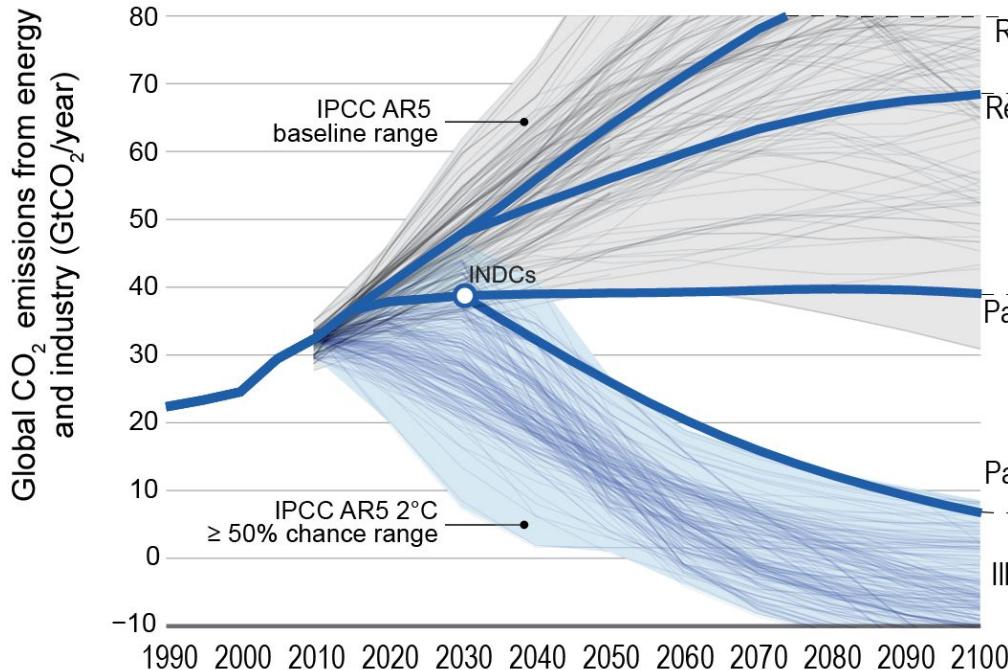
MODELLIERUNG

KOMPLEXER

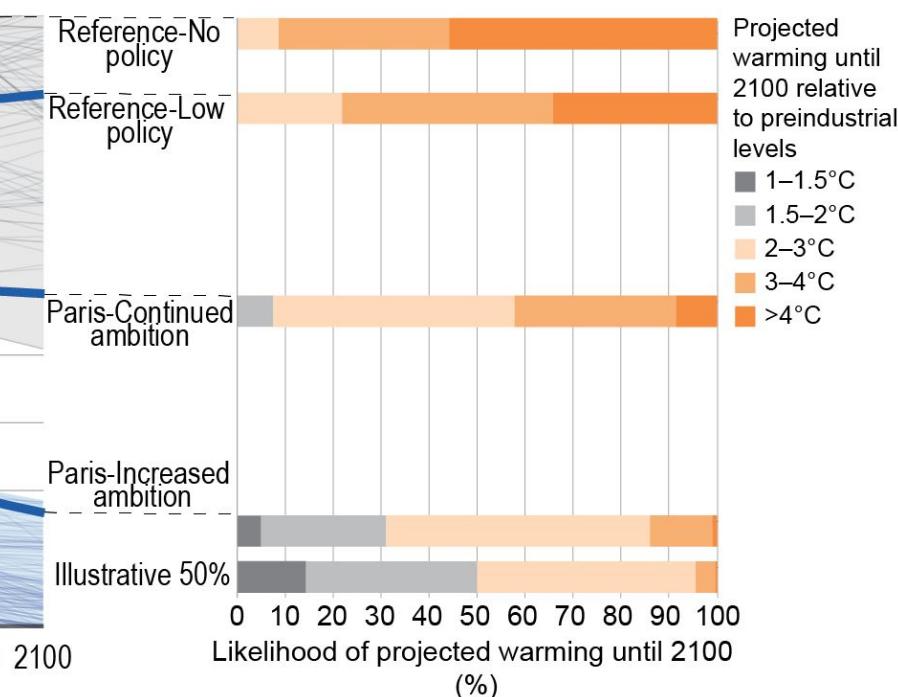
SYSTEME

MOTIVATION: KLIMAWANDEL & DEKARBONISIERUNG

(a) Emissions pathways



(b) Temperature probabilities



→ Notwendigkeit zur Infrastrukturtransformation

A.A. Faure, G.C. Iyer, L.E. Clarke, J.A. Edmonds, N.E. Hoffman, H.C. Meehan, J. Ringer, R. Schwarzkopf, J. Wilcox, G.B. Aman, J. Cresson, M. Jones, J. McFarland, A. Myneni, and W. Shi, 2015: Can Paris pledges avert severe climate change? *Science*, 350 (6265), 1189–1195. The figure version presented was extracted from the original as follows: For panel (a): The four lines representing the emissions trajectories were removed. For panel (b): The illustrative 50% likelihood projection was removed from the bottom of the chart. The source for the diagram given in U.S. Global Change Research Program Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I, Chapter 14. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=69337764>



MODELLE & ERWARTUNGEN

Rolle von Modellen bei Infrastrukturtransformation:

- Bestimmen von Transformationspfaden
Große Linien, Szenarien, Rahmenbedingungen: Exploration
- Abwägen verschiedener Optionen & Instrumente (Politik & Unternehmen)
Evaluation von Szenarien: Exploration
- Verständnis von Systemzusammenhängen
System(verhaltens)analyse: Erklärung
- Vorhersage von Systementwicklungen
Vorhersage (Prediction)

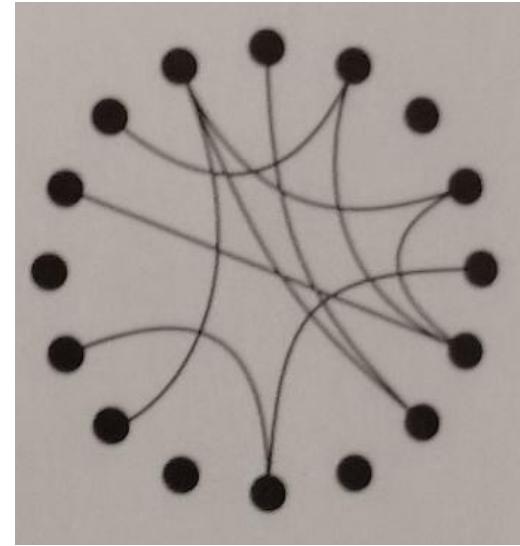


MODELLIERUNG KOMPLEXER SYSTEME

Interessante Systeme: **komplex**

Charakteristika komplexer Systeme:

- Systemkomponenten beeinflussen sich gegenseitig
- Feedbackschleifen
- chaotische Dynamiken (Relevanz von Anfangsbedingungen)
- Heterogenität
- Datenintensivität

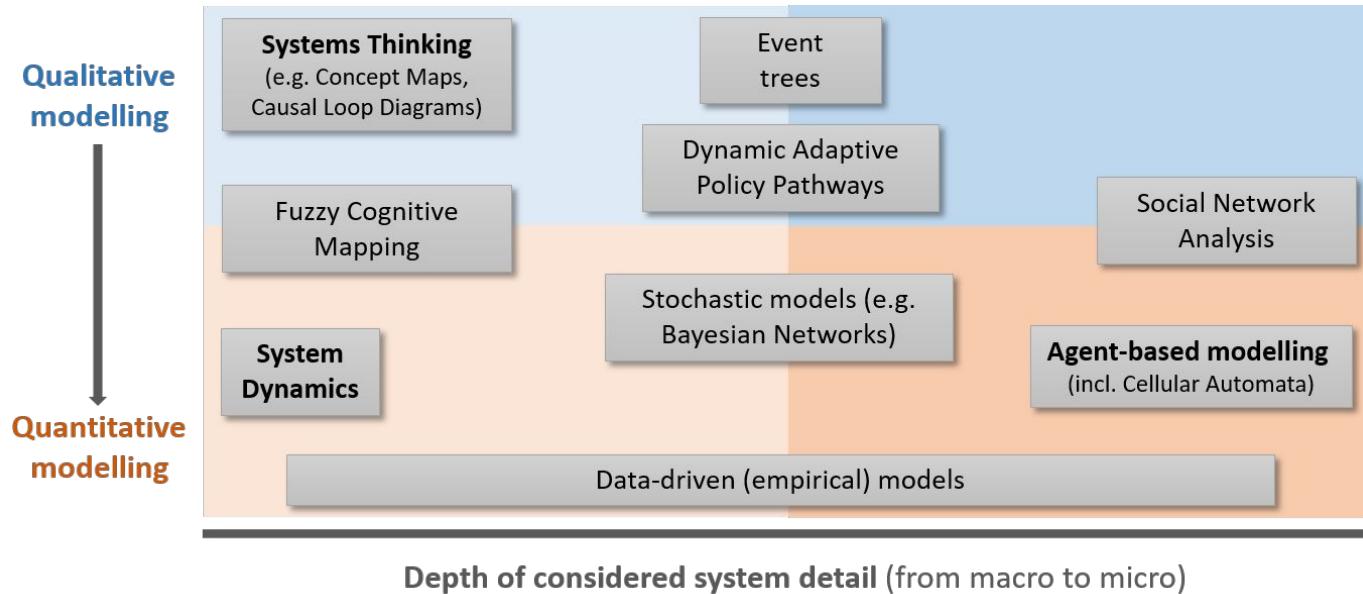


Quelle: M. Lima: Visual Complexity:
Mapping Patterns of Information



UNIVERSITÄT
LEIPZIG

MODELLIERUNGSANSÄTZE KOMPLEXE SYSTEME



Interessant für Politikinstrumente:
soziale Systeme → ST, SD, ABM

C. Schünemann et al., 2024, Complex System Policy
Modelling Approaches – Comparing Systems Thinking,
System Dynamics and Agent-based Modelling [in review]



MODELLIERUNG SOZIO-TECHNO-ÖKONOMISCHER SYSTEME

Komplexe Systeme allein herausfordernd

sozio-techno-ökonomische Systeme: Menschen & Interaktionen:

- Imperfekte Information
- Begrenzte Rationalität (Bounded Rationality)
- Heterogenität
 - Einstellungen & Werte
 - Demographie (geo-ökonomische Unterschiede)
 - Entscheidungsprozesse
 - Soziales Netzwerk



VORHERSAGEMODELLE

Häufiges Ziel / Wunsch:

Abbild der Realität & Minimierung von Unsicherheit

→ Vorhersagemodelle

Benötigt

auflösbare Unsicherheiten

Wissen um Initialzustand

Daten für vollständigen Parametersatz

deduktiver
Ansatz

Fokus auf Validierung



EXPLORATIVE MODELLIERUNG

Annahme:

Realistisches Abbild unmöglich → experimenteller Ansatz

Erhöhen von Unsicherheit, um System besser zu verstehen

Wie verhält sich das System, wenn Annahmen korrekt wären?

Daten, um Menge an Experimenten einzugrenzen

→ Informationen, um Entscheidung zu fundieren

abduktiver
Ansatz

Fokus auf Falsifizierung



REALISTISCHE ERWARTUNGEN AN MODELLE

- Verständnis von Möglichkeiten (Kontingenz)
- Durchführen von Experimenten
- Untersuchen von Handlungskorridoren
- Fragen: ‘Was wäre wenn, ...’
- Verstehen von Verhalten (Implikation von Theorien)
- Vergleichen von (Politik-)Instrumenten unter Annahmen
- Akzentuieren wesentlicher Modellaspekten, Abstraktion von unwesentlichen



ROLLE VON KONZEPTEN IN DER MODELLIERUNG

Datengetriebene Modellierung

Bisheriges Verhalten → zukünftiges Verhalten

Finden von Mustern in Daten

Basiert auf impliziten Wissen

Ableiten/Trainieren von Agenten

Konzeptgetriebene Modellierung

Identifikation relevanter

Konstrukte & Einflussfaktoren

Basiert auf explizitem Wissen

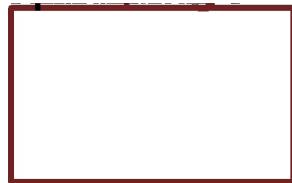
- Bedeutung für komplexe Systeme / Modelle?

- Wie viel Abstraktion / Detail?
Hochdimensionale Daten, Qualität & Chaos



KALIBRIERUNG & VERIFIZIERUNG

Konzeptualisierung
der realen Welt



Übereinstimmung
mehrerer Modelle



Datengenauigkeit und
Angemessenheit



Übereinstimmung von
Ergebnissen & Beobachtungen



Korrektheit des
Codes



minimale Modellveränderungen
durch Modellrekonfigurierung

Kalibrierung

Modellfeineinstellung
durch reale Daten

Herausforderungen:

- Stochastizität
- Equifinality
- Counterfactuals
- Robustheit
- Emergenz
- Generative Sufficiency



TEIL II:

MODELLIERUNG

AM LEHRSTUHL

EM & N

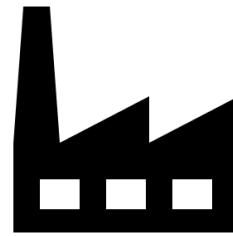
MOTIVATION: ROLLE PRIVATER HAUSHALTE

2020: Anteil HH an Primärenergieverbrauch: 27.4%



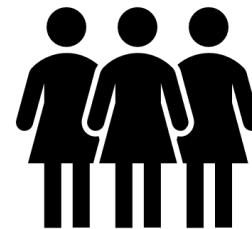
Politik & Verwaltung

‘direkter’ Einfluss (Demokratien)



profit-orientierte Unternehmen

rational choice:
Setzen von Anreizen



NROs & not-for-profits

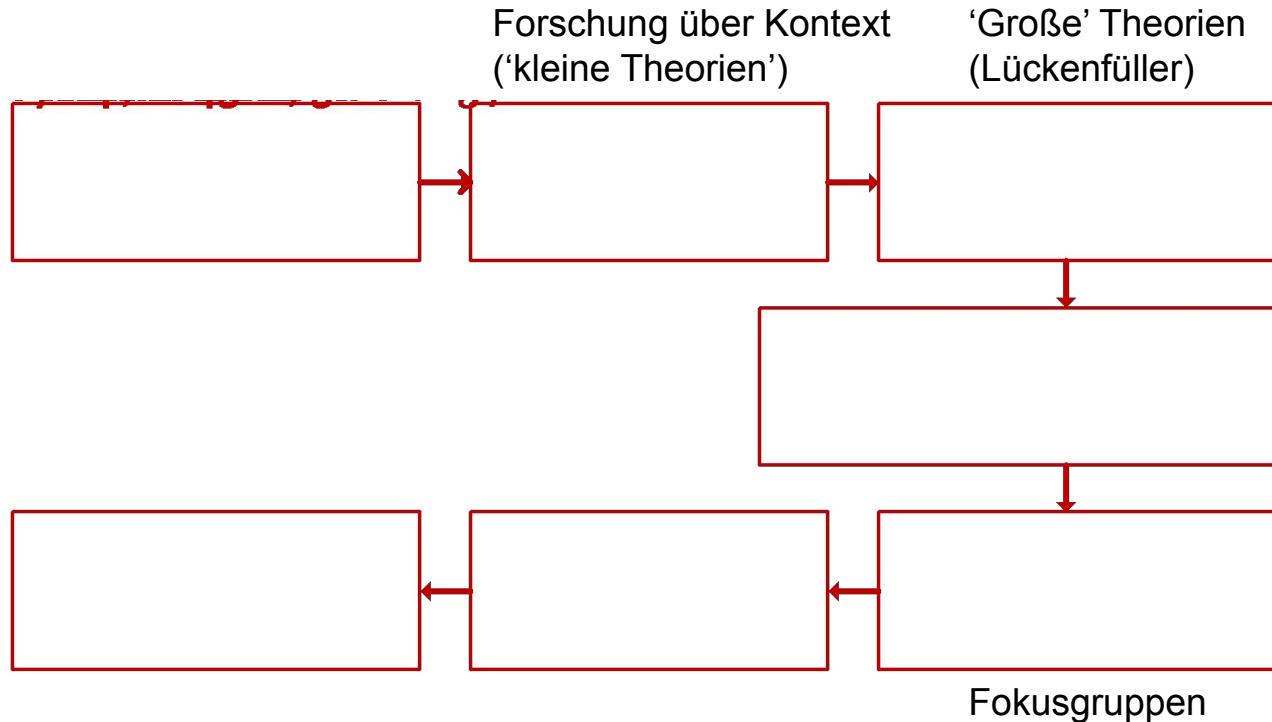
ärente Motivation:
Wertegeleitet



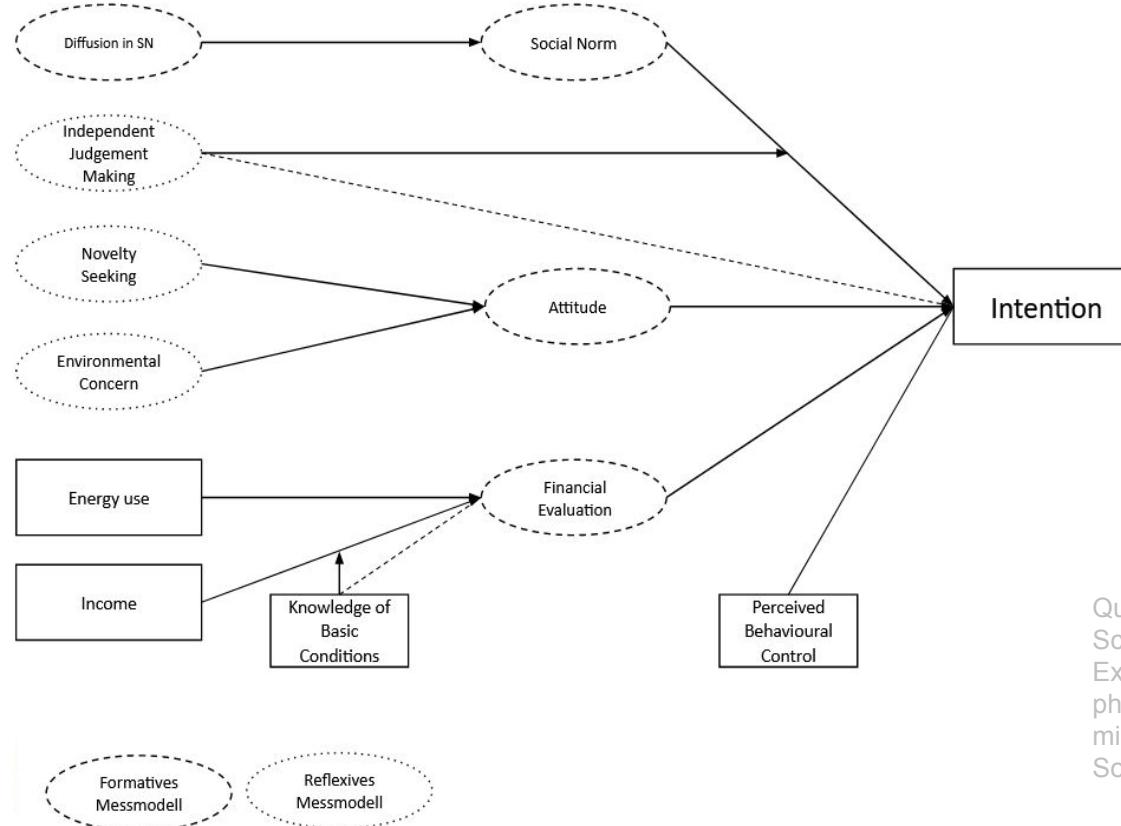
private Haushalte

n: Menschen:
nicht-rationale, komplexe
Entscheidungen

KONZEPTGETRIEBENES VORGEHEN



STRUKTUR ENTSCHEIDUNGSFAKTOREN

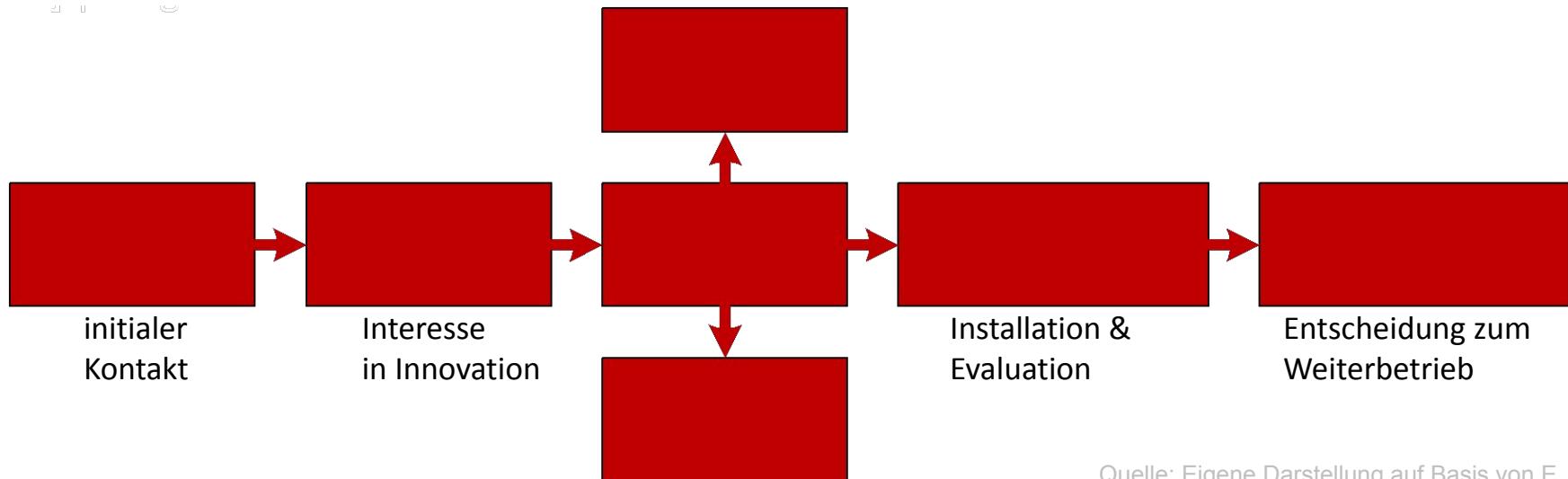


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von E. Schulte et al. Same same, but different: Explaining heterogeneity among potential photovoltaic adopters in Germany using milieu segmentation, Energy Research & Social Science, 2023



DIFFUSION OF INNOVATION: PROZESS (ROGERS)

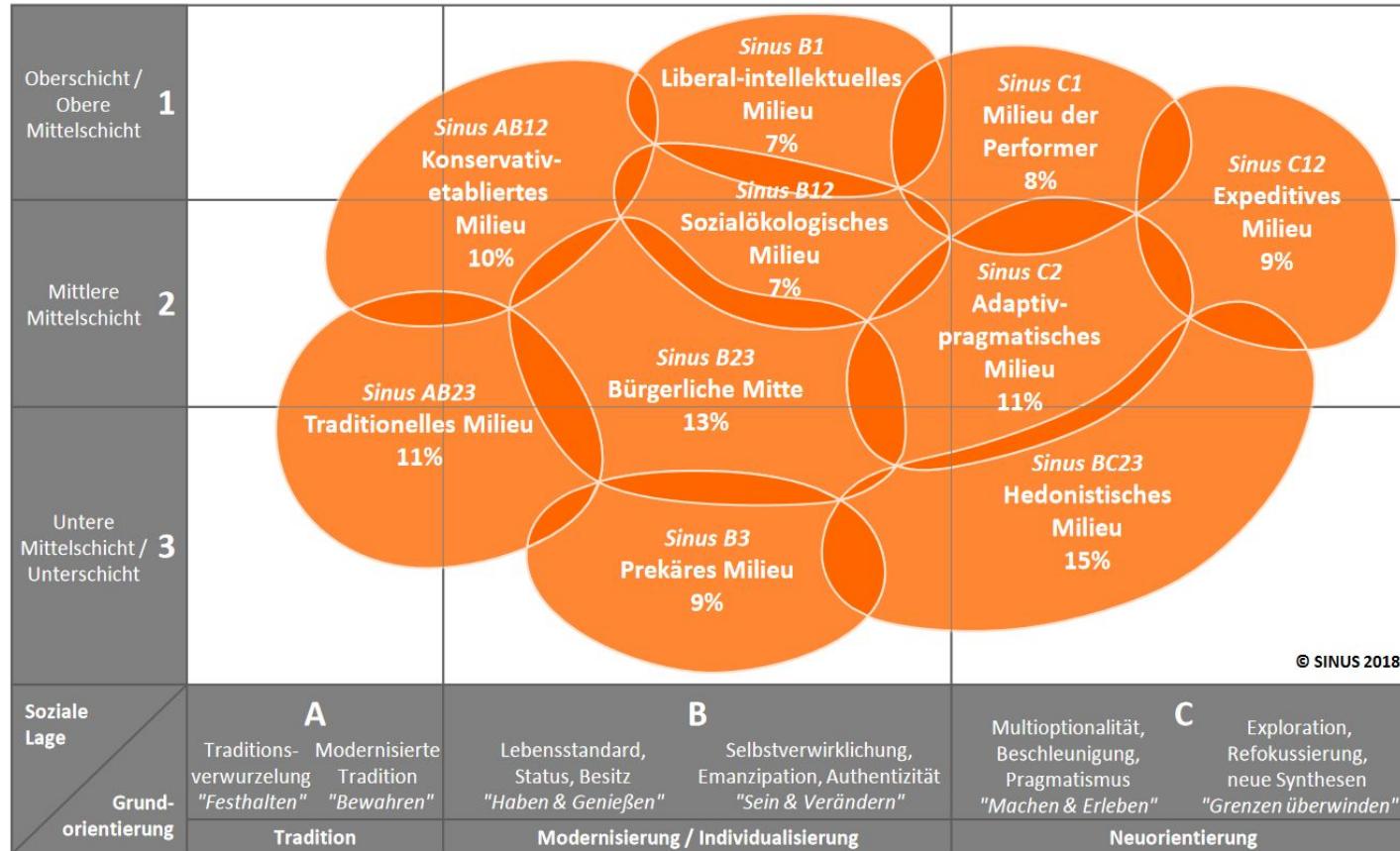
warum, wie & wie schnell breiten sich neue Ideen & Technologien aus?



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von E. M. Rogers: Diffusion of innovations (5. Aufl.). New York: Free Press, 2003



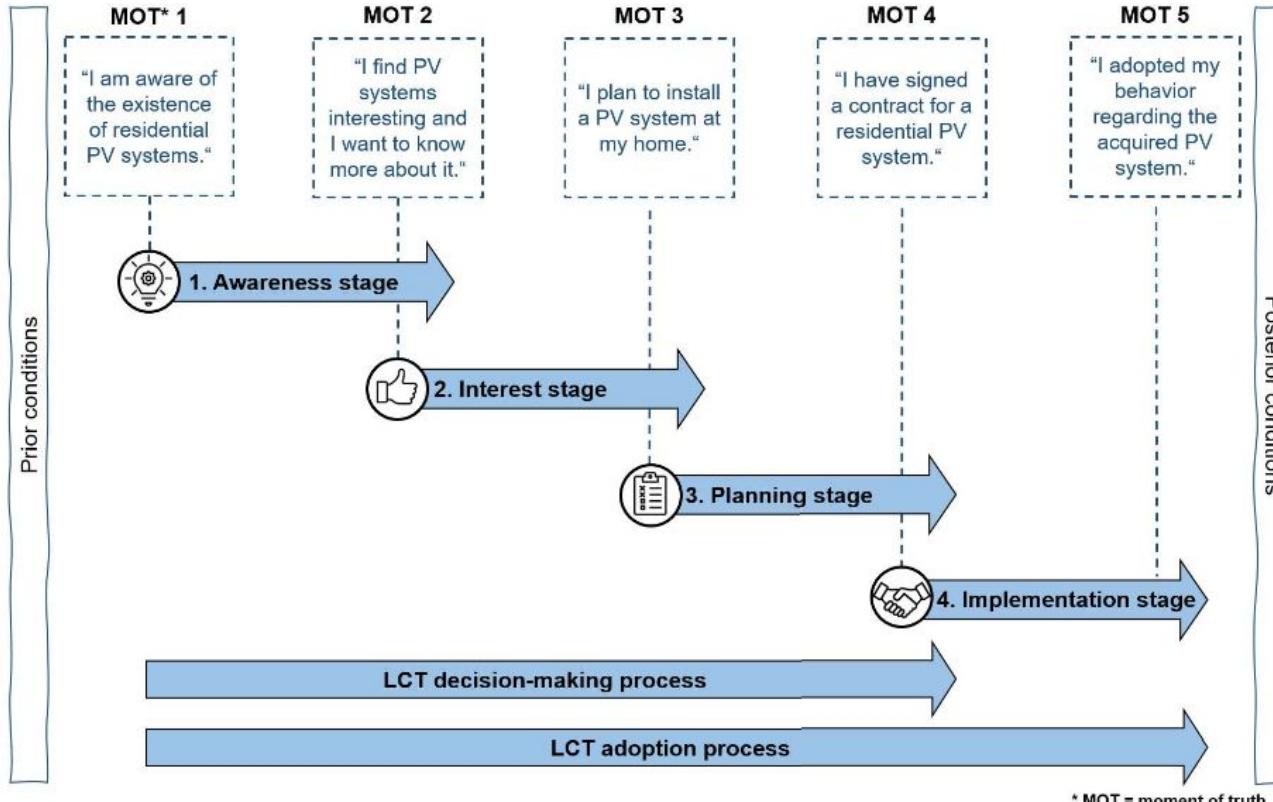
EXKURS: DIE SINUS MILIEU SEGMENTIERUNG 2018



Quelle: SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH



FOKUSGRUPPEN



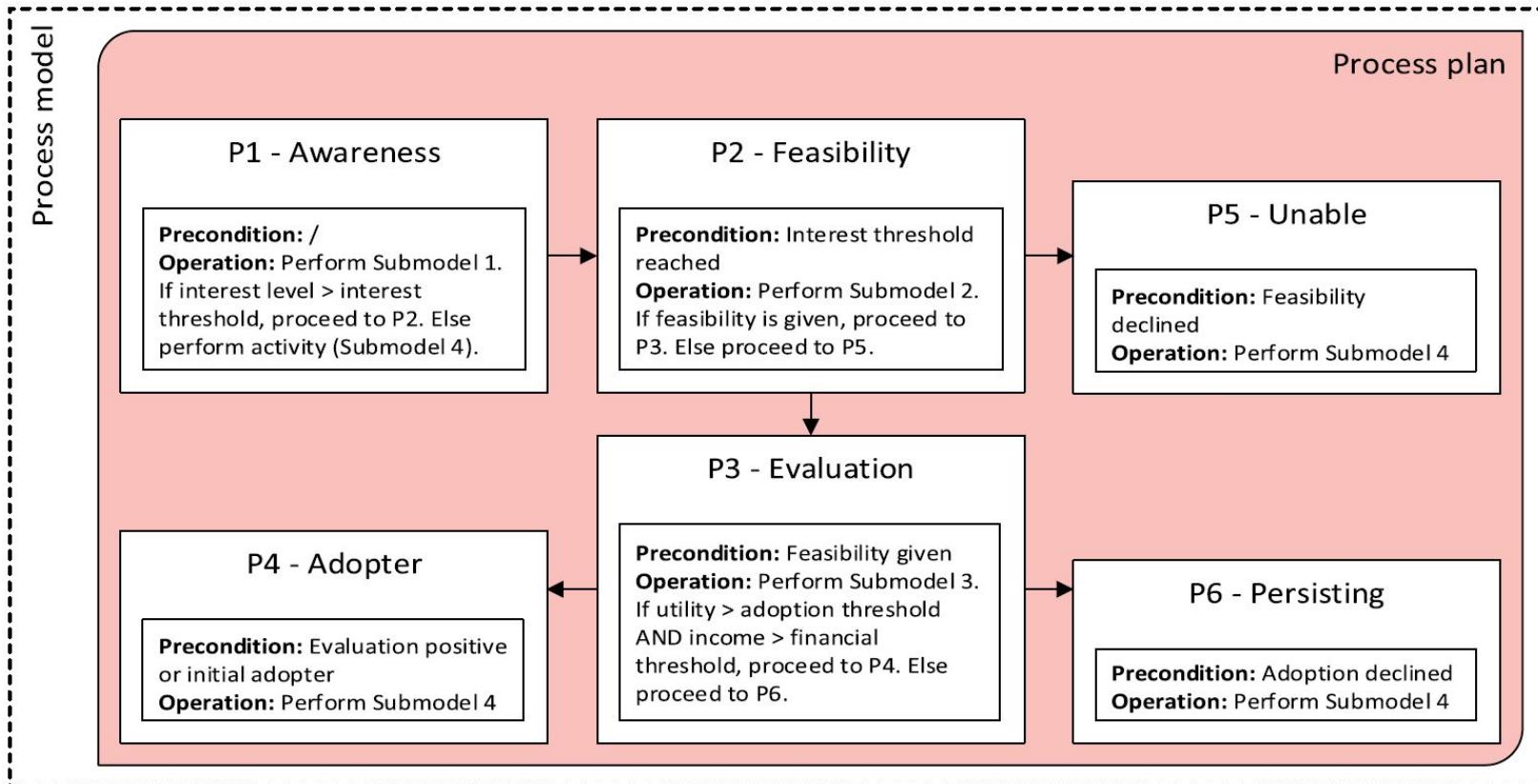
Bündlung ähnlicher Milieus,
Abbildung aller

Ziel: Verständnis von
Phasen, Einflussfaktoren &
Entscheidungsvariablen

F. Scheller et al., Stakeholder dynamics in residential solar energy adoption: findings from focus group discussions in Germany, Energy Research & Social Science 76(5):102065, 2021



PROZESSMODEL PVACT



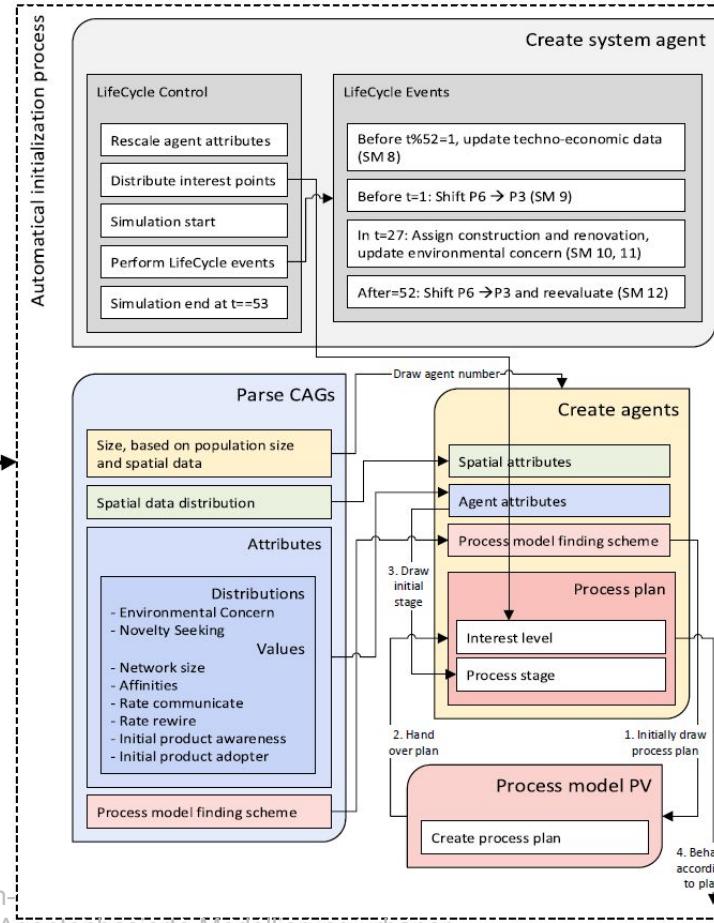
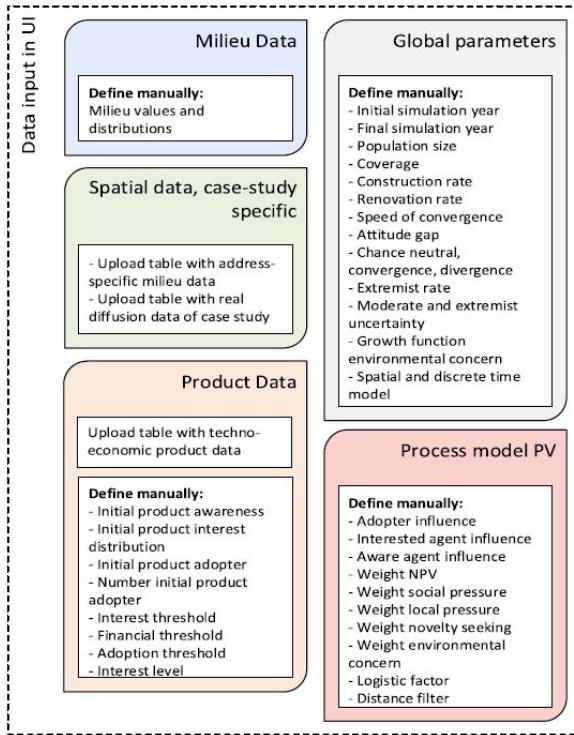
PHASE 3: EVALUATION

Berechnung der gewichteten Nutzwerts $U(i)$ anhand der Gewichte w und dem Teilnutzen $U_k(i)$

$$U(G) = w_{\text{Finanziell}} \cdot U_{\text{Finanziell}}(G) + w_{\text{Sozial}} \cdot U_{\text{Sozial}}(G) + w_{\text{Lokal}} \cdot U_{\text{Lokal}}(G) + w_{\text{Umweltbew.}} \cdot U_{\text{Umweltbew.}}(G) + w_{\text{Innovativität}} \cdot U_{\text{Innovativität}}(G)$$



PVACT



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von D. Abitz & S. Johanning: Architektur und Umsetzung des Multi-Agenten-Modells zur Diffusion von Nachhaltigkeitsinnovationen in Agentenbasierte Modellierung urbaner Transformationsprozesse. Smart Utilities And Sustainable Infrastructure Change, 2022



GEO-ÖKONOMISCHE DATEN DER FALLSTUDIE

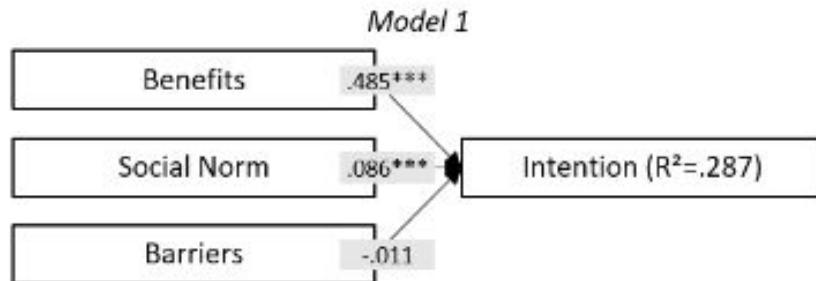
Information	Quelle	Größe Datensatz	Coverage (%)
Straße, Hausnummer, PLZ	Inspire Datensatz, Land Sachsen	60.197	100 %
Eigentümerinform ationen 'Flurstück'	Stadt Leipzig	56.483	93,8 %
#Haushalten an Adresse	Microm	53.848	95,3 %
Dachorientierung & -neigung	3D-Stadtmodell, Stadt Leipzig	48.145	89,4 %
Kaufkraft und Milieu	Microm	48.112	99,9 %
Gebäudefläche & Zentroid	Stadt Leipzig	48.112	100 %

Adressgenaue Darstellung
von ~ 48T Haushalten:

- Gebäudeinformationen
- Dominantes Milieu
- Kaufkraft
- Räumliches Umfeld

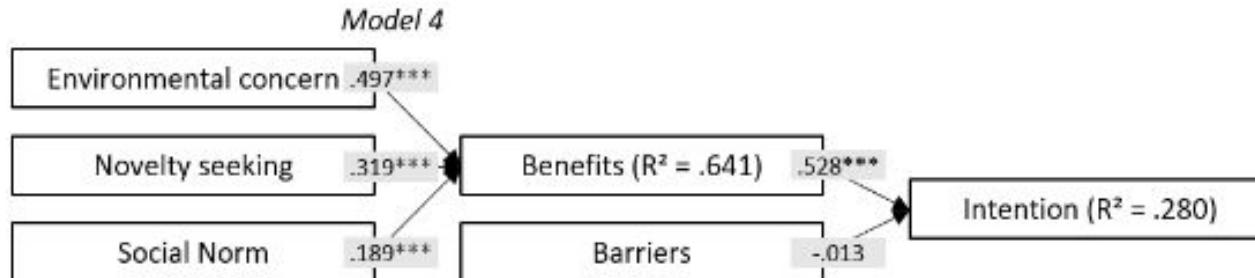


STATISTISCHES MODELL ZUR FAKTORENBESTIMMUNG



Vergleich verschiedener Modelle zur Erklärung von Intention

Alternativen in Struktur und Gewicht



* p<.1; ** p<.05; *** p<.01

Quelle: Eigene
Darstellung E. Voigt



EMPIRISCHE MODELLFUNDIERUNG

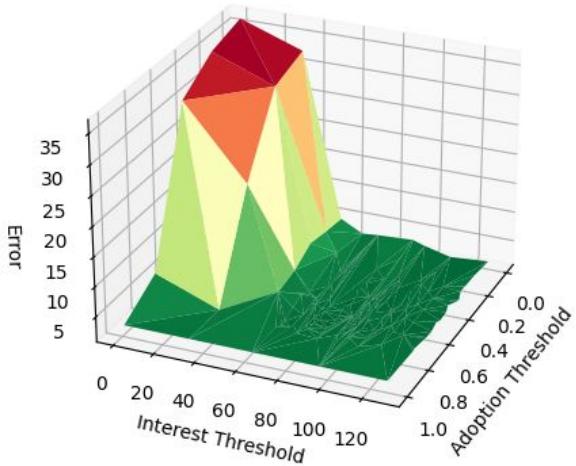
Tabelle 10.2.: Ergebnisse der linearen Regression der fünf Komponenten der Nutzwertfunktion auf die angegebene Kaufabsicht.

	Koeff.	Std. Fehl.	t	p-Wert	Beta	
Innovationsaffinität	0,372	0,027	13,890	0,000	0,267	Ergänzung fehlender Parameter durch repräsentative Umfrage von Gebäudeeigentümern
Umweltbewusstsein	-0,159	0,038	-4,200	0,000	-0,079	
Finanzielle Bewertung	0,676	0,028	23,970	0,000	0,470	
Sozialer Druck	0,011	0,024	0,440	0,659	0,008	
Räumlicher Druck	0,181	0,028	6,520	0,000	0,126	
Konstante	-0,077	0,031	-2,480	0,013		Ableitung von Modellgewichten
Anzahl Beobachtungen	1800					
F(5, 1794)	238,76					
p-Wert	<0,001					
R²	0,3996					Datenvalidierung

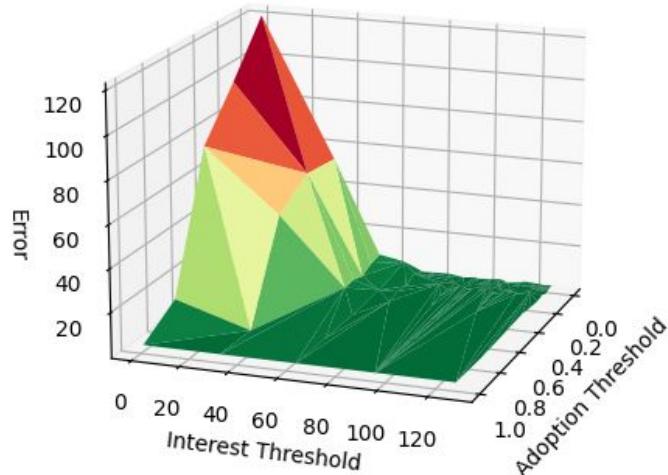
Quelle: E. Schulte, F. Scheller, Empirische Verankerung der Haushaltssagenten und ihres Photovoltaik-Investitionsverhaltens, in Agentenbasierte Modellierung urbaner Transformationsprozesse. Smart Utilities And Sustainable Infrastructure Change, ISBN 978-3-8325-5413-2, 2022



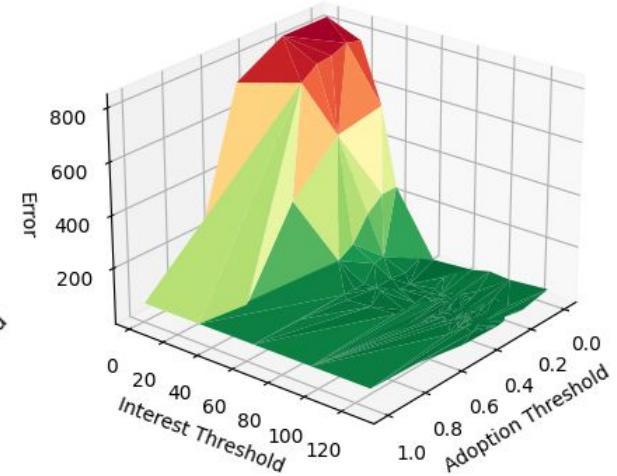
KALIBRIERUNG DURCH FEHLERMINIMIERUNG



Durchschnittliche
Abweichung im Zubau



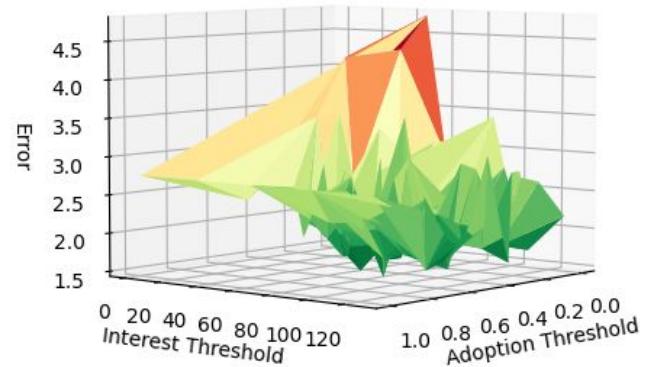
Quadratische durchschn.
Abweichung im Zubau



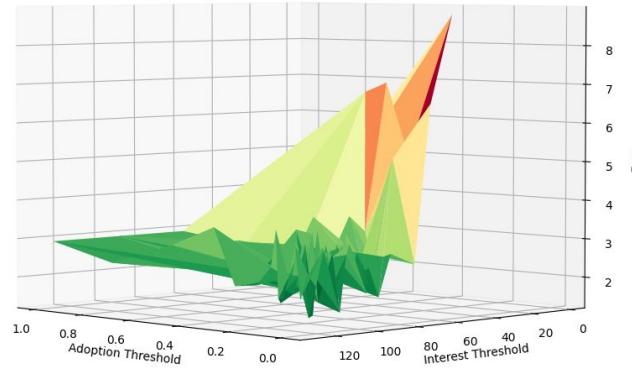
Durchschn. Abweichung in
Anzahl Gesamtanlagen



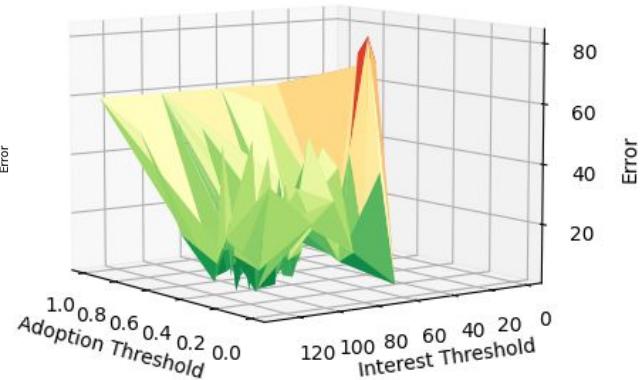
KALIBRIERUNG DURCH FEHLERMINIMIERUNG: GENAUERER BLICK



Durchschnittliche
Abweichung im Zubau



Quadratische durchschn.
Abweichung im Zubau

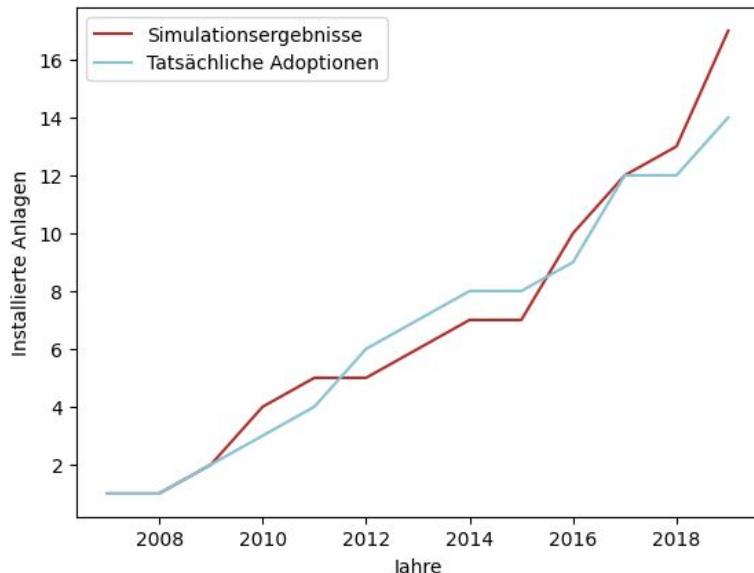


Durchschn. Abweichung in
Anzahl Gesamtanlagen

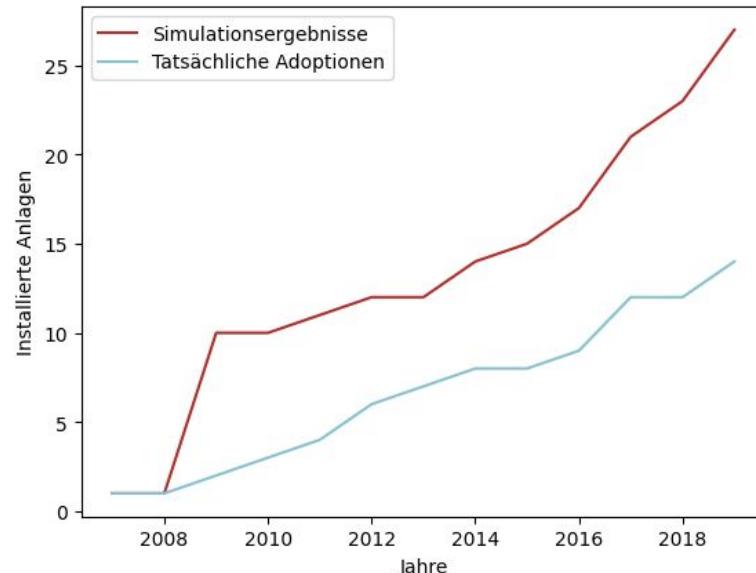


PROBLEME MIT KALIBRIERUNGSANSATZ

Abweichung ist trotz sehr unterschiedlicher Parameter teils sehr gering



Gleiche Läufe können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen



UMGANG MIT PLURALITÄT

Akzeptieren, dass 'Realität stochastisch' ist

Angemessenste Repräsentation der Realität nicht singuläre Parameterkombination, die die Fehlermetrik minimiert, sondern Schar plausibler / interessanter Welten

Gruppieren vergleichbarer Simulationsläufe über verschiedene Parameter, stochastische Realisierungen und Szenarien

→ robustere Ergebnisse?

Bessere Vergleichbarkeit durch direkten vergleich 'gleicher Realitäten' zwischen Maßnahmen

Prinzip der Vielfalt statt Sparsamkeit? (Leibniz vs. Ockham)



WAS WOLLEN UND KÖNNEN WIR ERWARTEN?

Für Erwartungen an Modell: Betrachten des Anwendungskontexts

Schlüsselfrage: wie komplex & sozial ist Kontext?

Vorhersagen komplexer, sozialer Systeme (nahezu?) unmöglich

Verständnis von Systemen & -interaktionen? beschränkt möglich

Modellverhalten unter (verschiedenen) Annahmen:

Untersuchen von Modellfaktoren:

welchen Einfluss haben verschiedene Gewichte für Entscheidungsfaktoren?

wie wirkt Anpassung der Modellstruktur auf das Modell?

Wechselwirkungen innerhalb des Systems & Systeminterventionen

...



VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT



Simon Johanning

Lehrstuhl für
Energiemanagement & Nachhaltigkeit

Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Institut für Infrastruktur und
Ressourcenmanagement

Uni Leipzig
Grimmaische Str. 12

D-04109 Leipzig

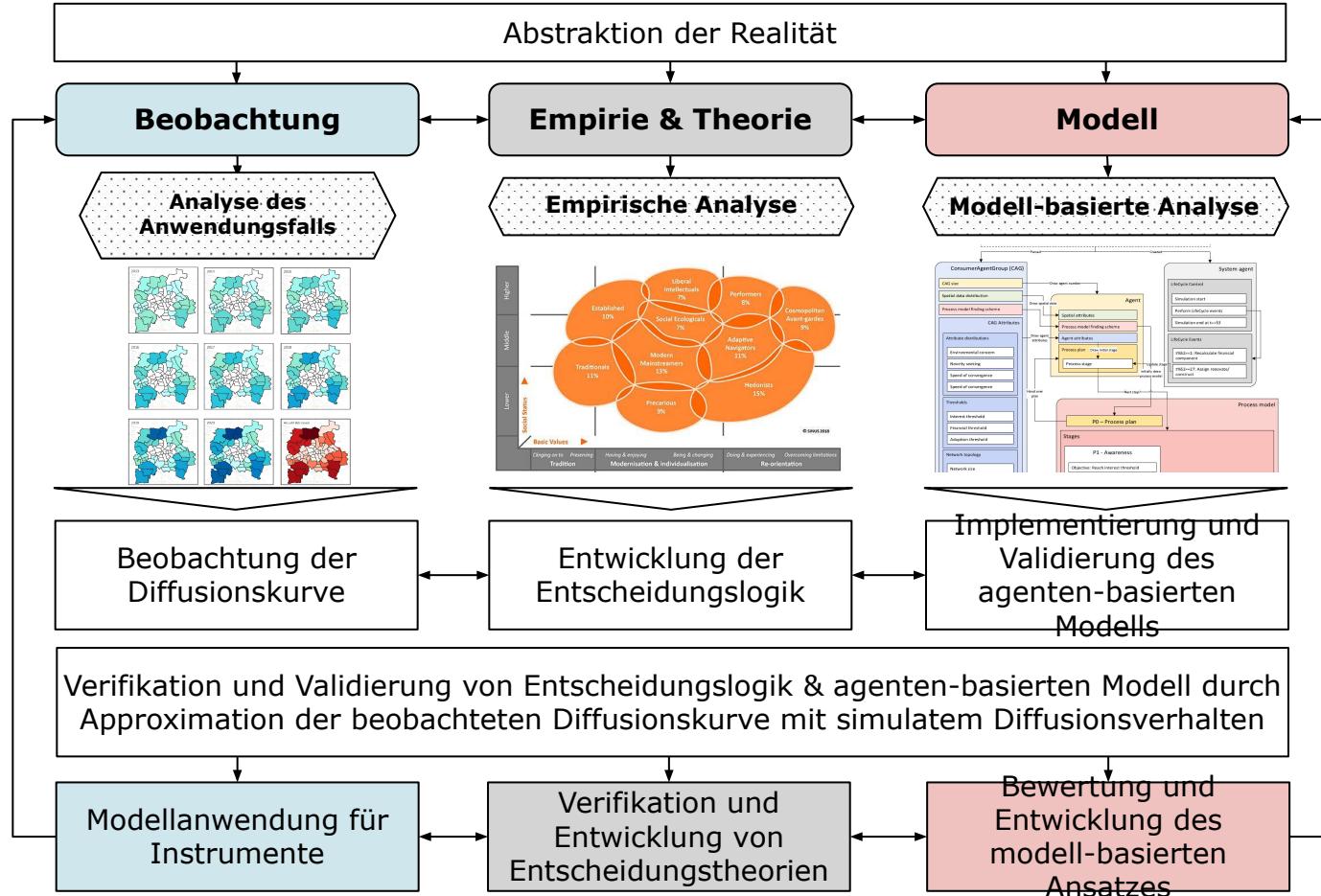
Tel.: +49 341 97 33554
johanning@wifa.uni-leipzig.de
www.wifa.uni-leipzig.de/iirm



**Energiemanagement &
Nachhaltigkeit**



UNIVERSITÄT
LEIPZIG



Quelle: Eigene
Darstellung F. Scheller



HUMAN DECISION MAKING

multitude of decision factors:

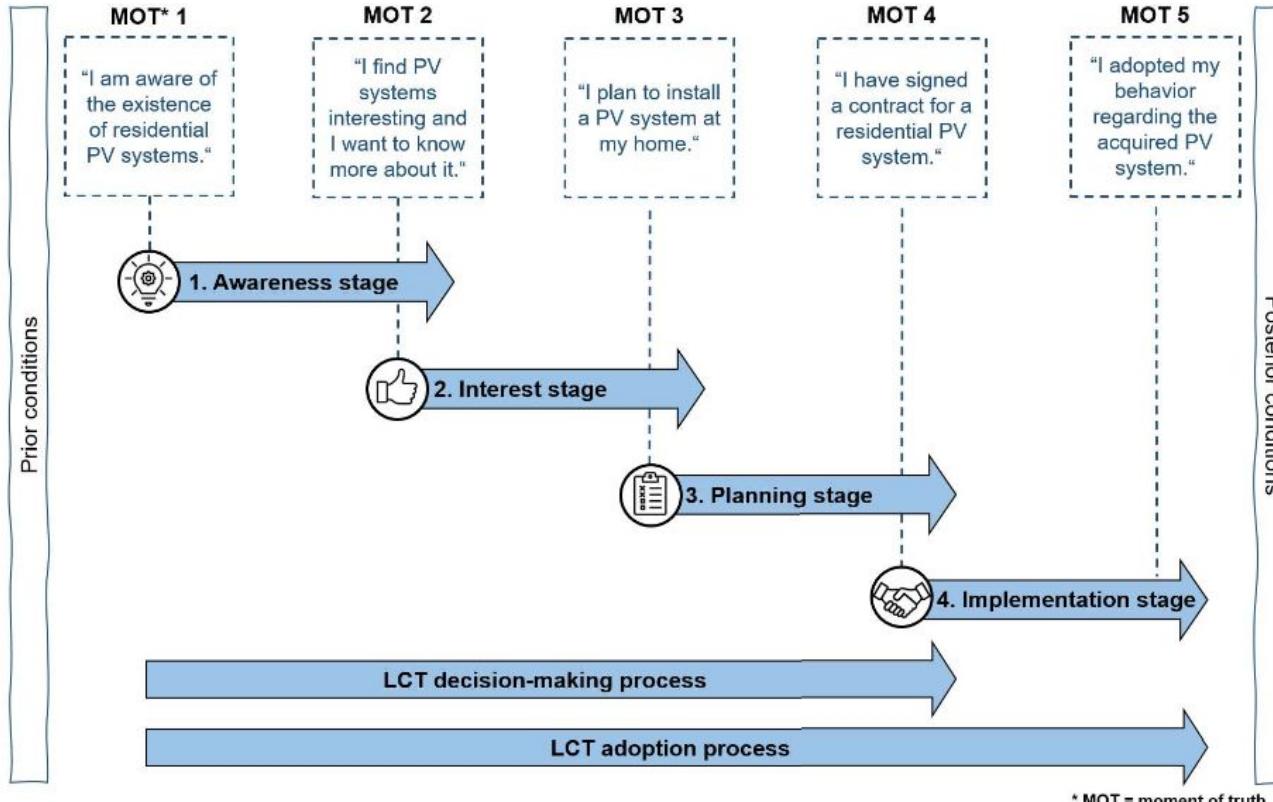
- financial benefit
- societal and peer pressure
- opinion dynamics
- attitudes
- perceptions
- preferences
- advertisement
- cognitive factors
-

no direct control → incentives & regulatory measures

necessity to study how innovations spread in population → innovation diffusion



FOKUSGRUPPEN



- 3 Gruppen (Sept. 2019) á 6 TN
- Bündlung ähnlicher Milieus, Abbildung aller
- Konkrete Beschäftigung mit Adoptionsprozess
- Ausgeglichene Wohnsituation
- Ziel: Verständnis von Phasen, Einflussfaktoren & Entscheidungsvariablen

F. Scheller et al., Stakeholder dynamics in residential solar energy adoption: findings from focus group discussions in Germany, Energy Research & Social Science 76(5):102065, 2021



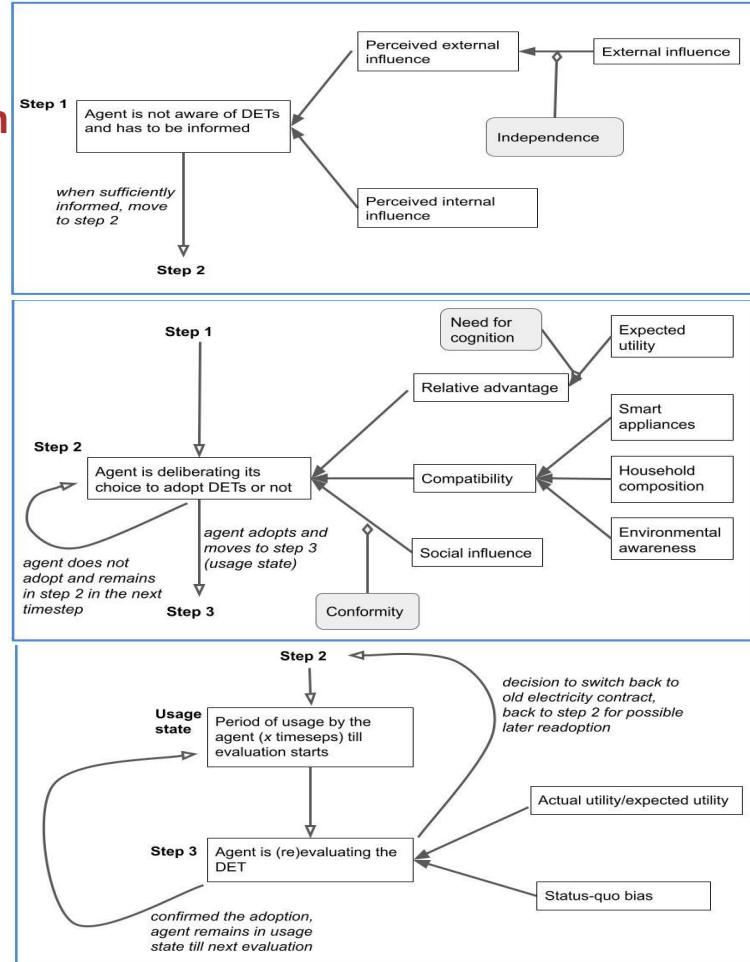
DETACT Dynamic Electricity Tariffs and interACTION

importance of households in supply-driven energy system (electro-mobility, heat pumps, ...)

dynamic electricity tariffs award
flexible electricity consumption

consumption heavily driven by **patterns** and **habits**

willingness to **change habits** and **respond** to signals



HEADACT renewable HEat technology ADoption and interACTION

decarbonization in **heat sector** critical and slow

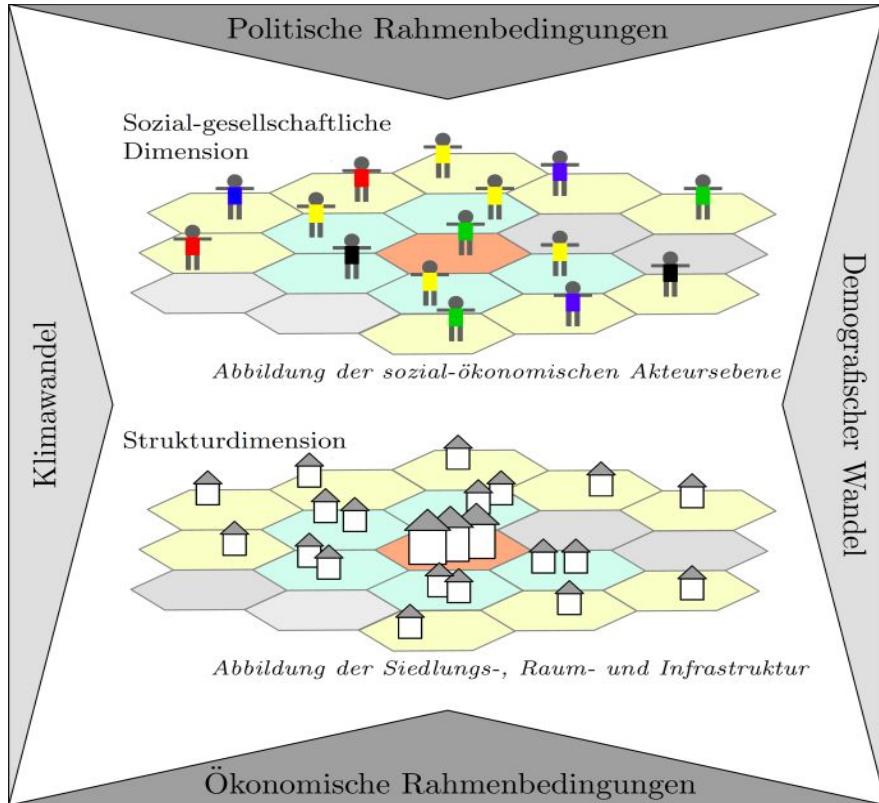
debate on building heating act (Gebäudeenergiegesetz) in Germany shows importance of residential heat transformation & **challenges** in sector decarbonization

regulatory measures **delicate** when concerning residential actors

- importance of investigating **acceptance** questions and **investment decision** factors
- model development based on **literature** research, **focus groups** analyses and quantitative **surveys** of milieu-dependent behavior & intention



SOCIO-TECHNICAL PERSPECTIVE



complex system

→ **multiple perspectives** required

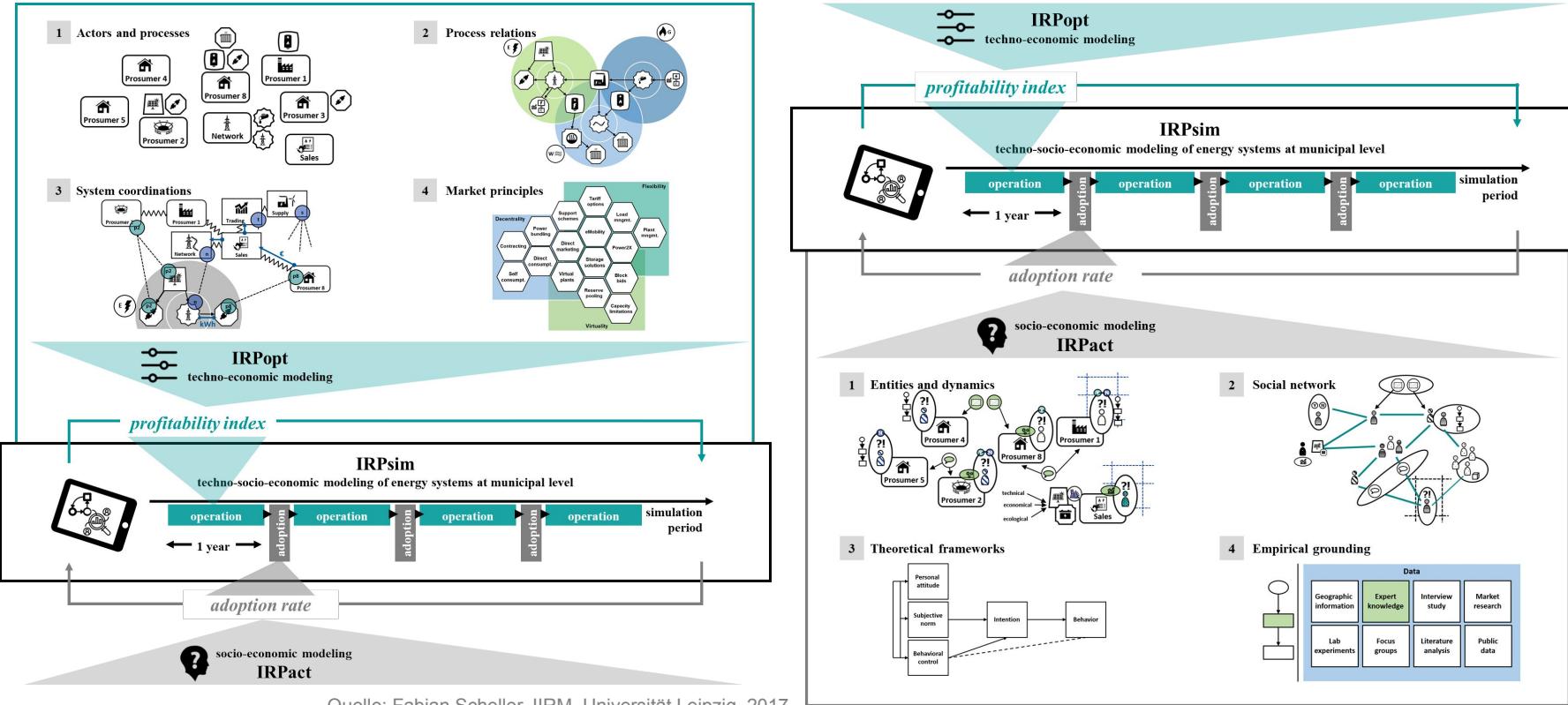
integration of **structural** and **social** dimensions, as well as **external factors** in one model (suite)

common structures,
but contextual factors

→ requires a model **framework** and
contextually **specific models**



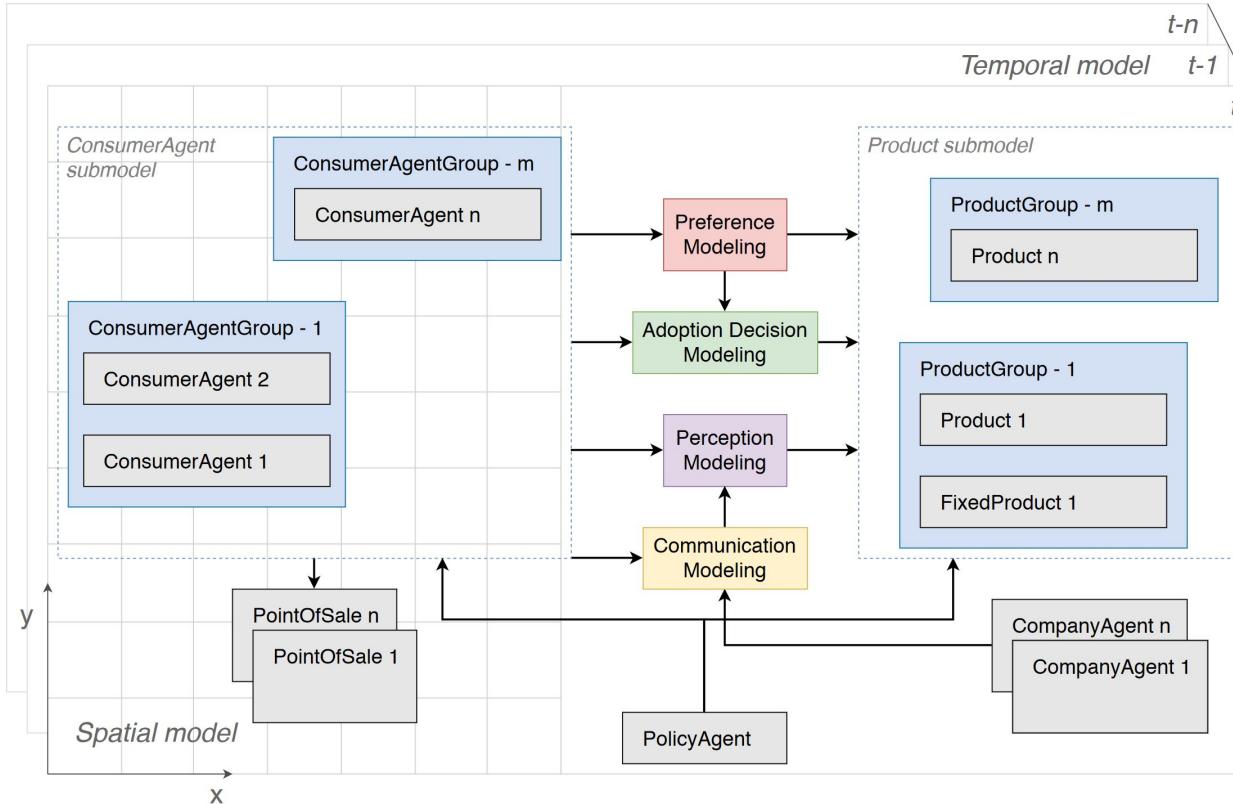
AGENT-BASED EXTENSION OF IRPopt



Quelle: Fabian Scheller, IIRM, Universität Leipzig, 2017.



IRPACT



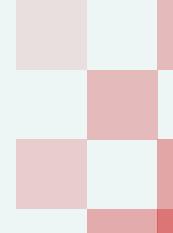
model **framework** for diffusion of sustainable products

broad, configurable frame and **simulation infrastructure** (IRPsim)

implemented in Java, configurable through .json files or web-interface



The Idea



Important model detail:

All random numbers are drawn from a pseudo-random list initiated with a seed

Same seed means same exact sequence of events

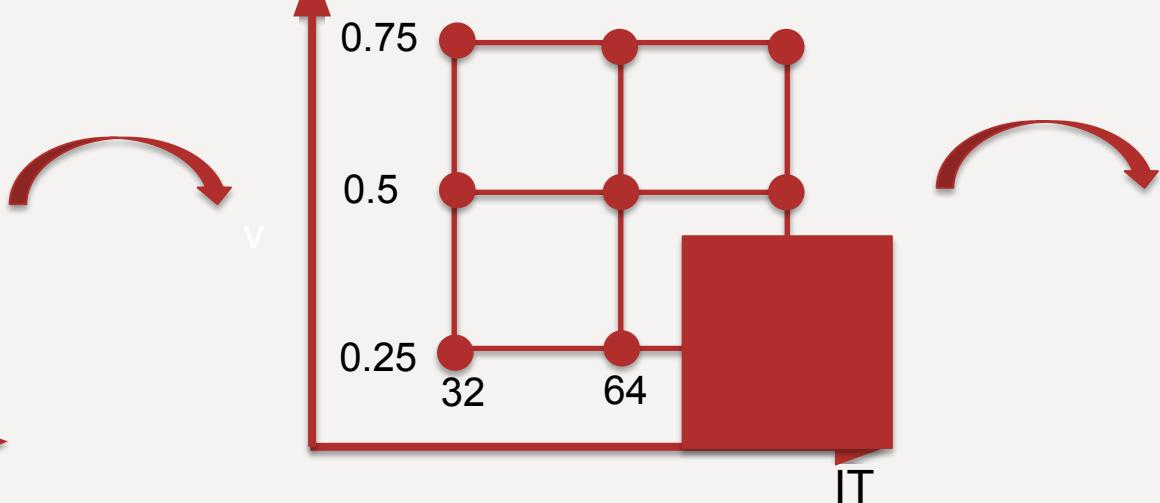
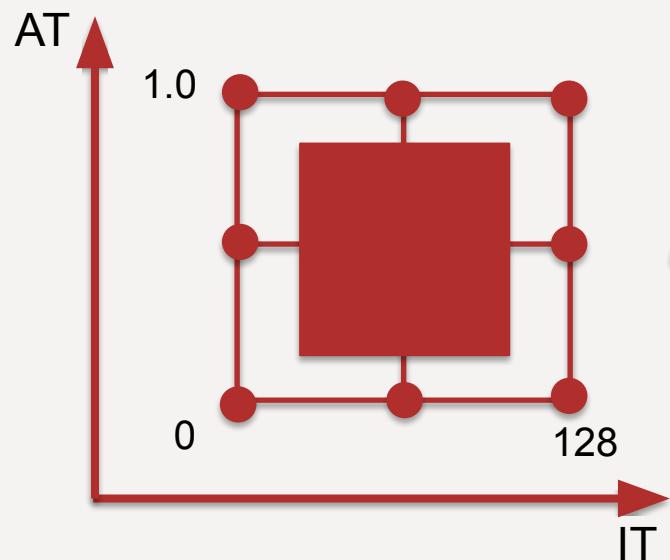
Model executions are (kind of) deterministic, making them comparable

v

Idea

Compare measures/policy instruments throughout several parameter constellations and multiple *comparable* instances

Finding the Right Parameter Range



The Approach



- 1) Define the metric M, parameter range $[\underline{AT}, \overline{AT}] \times [\underline{IT}, \overline{IT}]$, granularity $g \in \mathbb{N}^+$, measures K $\ni k_0$, and the number of repetitions n,

Set evaluation reference, parameters and computational demand

- 2) Generate $g^2 * n$ pair-wise different seeds S_L for the random number generator,

Set model instances where it behaves (stochastically) different

- 3) Associate each $i \in [0, g^2 - 1]$ with the parameter combination

$(AT_i, IT_i) = (AT + (i \bmod g) * \frac{\overline{AT} - \underline{AT}}{g}, IT + (\lfloor \frac{i}{g} \rfloor * \frac{\overline{IT} - \underline{IT}}{g}))$ for an equidistant evaluation grid

Span the grid (standard transformation 1D to 2D)



The Approach

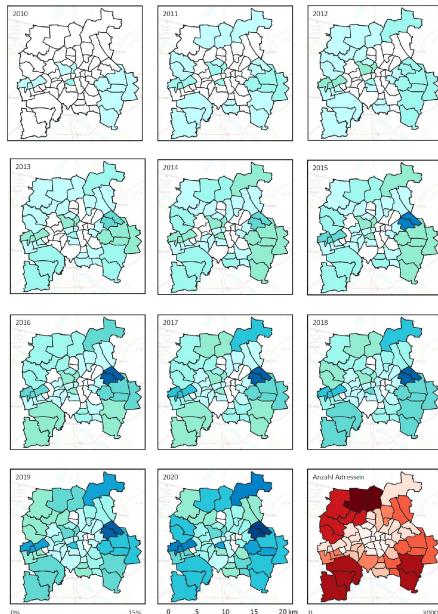
- 4) For each $k \in K, i \in [0, g^2 - 1], j \in [0, n - 1]$ evaluate the model at parameters AT_i, IT_i with seed $s_l \in S_L, l = i * n + j$, yielding model behavior P_{ijk}

Run model for all instances

- 5) For each pair $k, \hat{k} \in K$, analyze $M(P_{ijk}, P_{ij\hat{k}})$,
Between comparable instances, compare with the scenario performance

- 6) For each repetition j aggregate $M(P_{ijk}, P_{ij\hat{k}})$ across $j \in [0, n - 1]$ and generate the parameter performance matrix across parameters AT_i, IT_i .
Aggregate all runs by respective model parameterization

AP 2: DECISION LOGIC OF DECENTRAL ACTORS IN THE ENERGY AND HEAT SECTOR



What factors can explain the difference in diffusion between different municipal districts?

- Share of single houses
- House properties
- Population density
- Income
- Sinus-Milieus

The goal of the model is to **reproduce** the **observed diffusion** in Leipzig while taking into account empirical insight from the **survey** and the **case study**

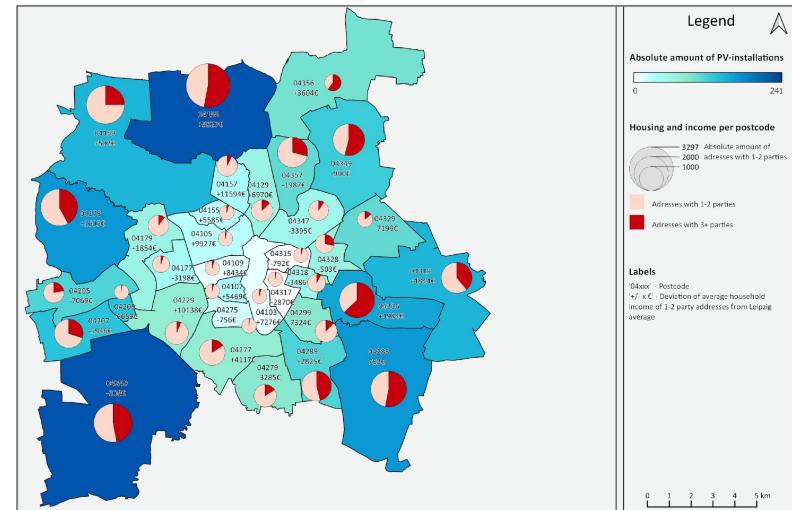
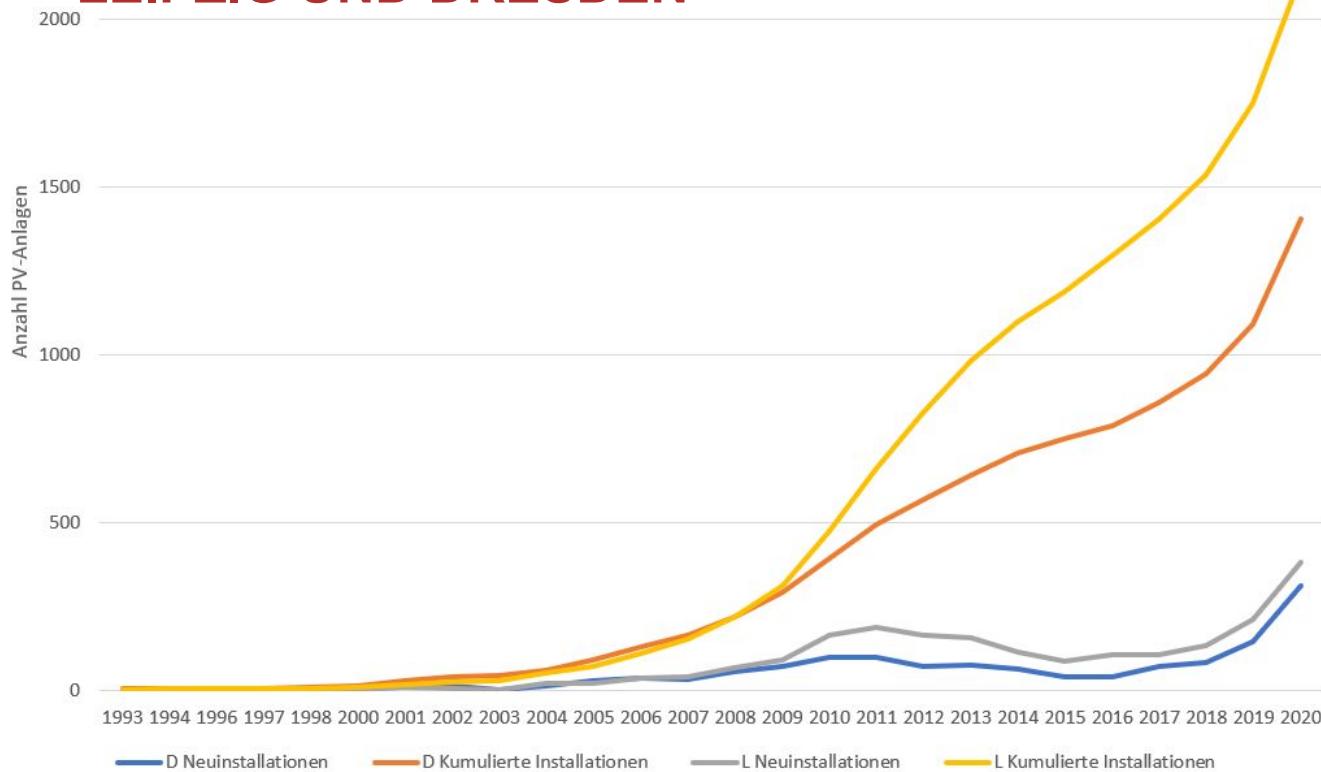


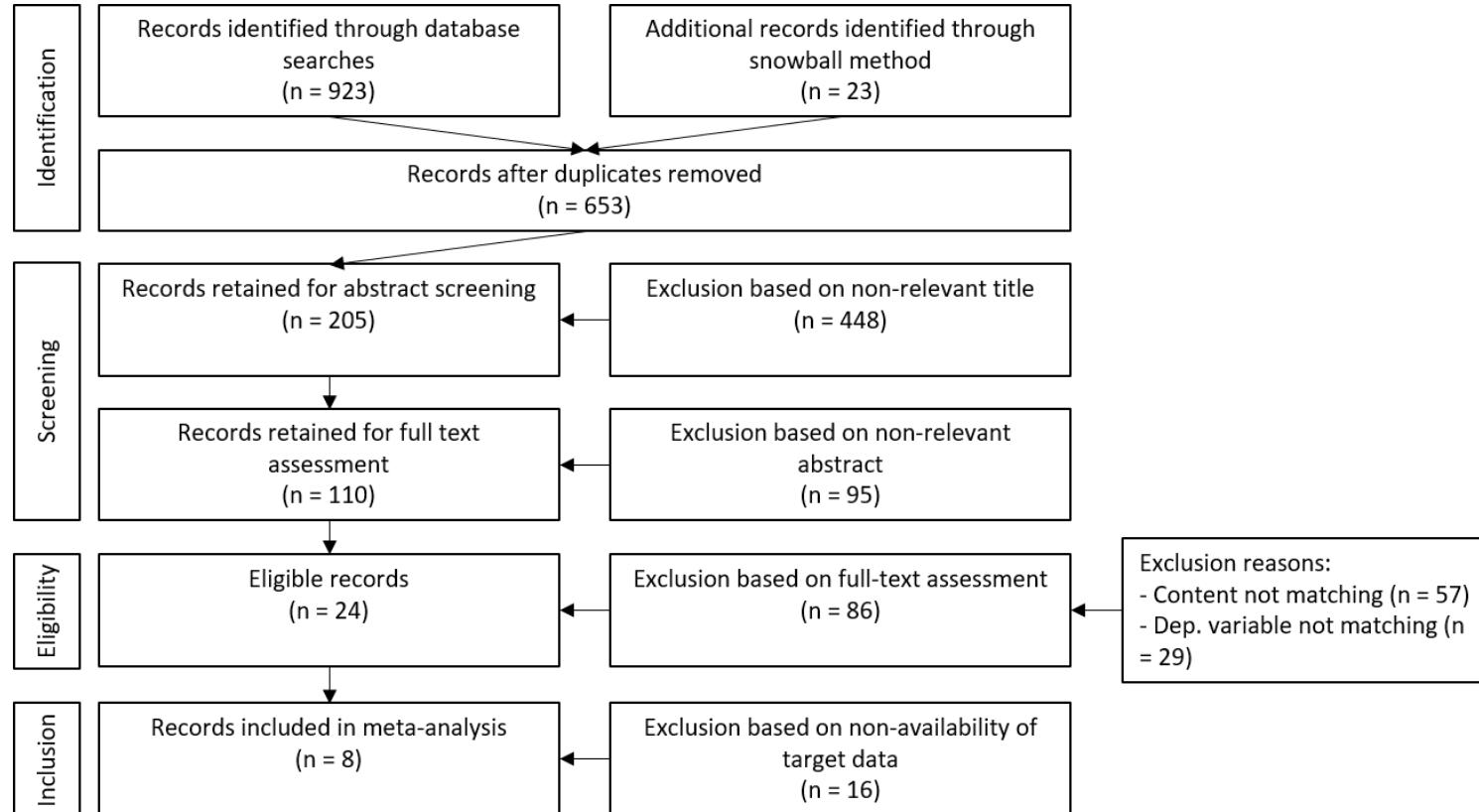
Abb. X: Relativer Diffusionsverlauf von Aufdach-Photovoltaikanlagen in den Leipziger Stadtteilen. Quelle: Eigene Darstellung



FALLSTUDIEN ZUR UNTERSUCHUNG DER PV-DIFFUSION: LEIPZIG UND DRESDEN



A META-ANALYSE FOR DERIVING COMPONENT WEIGHTS



A META-ANALYSE FOR DERIVING COMPONENT WEIGHTS

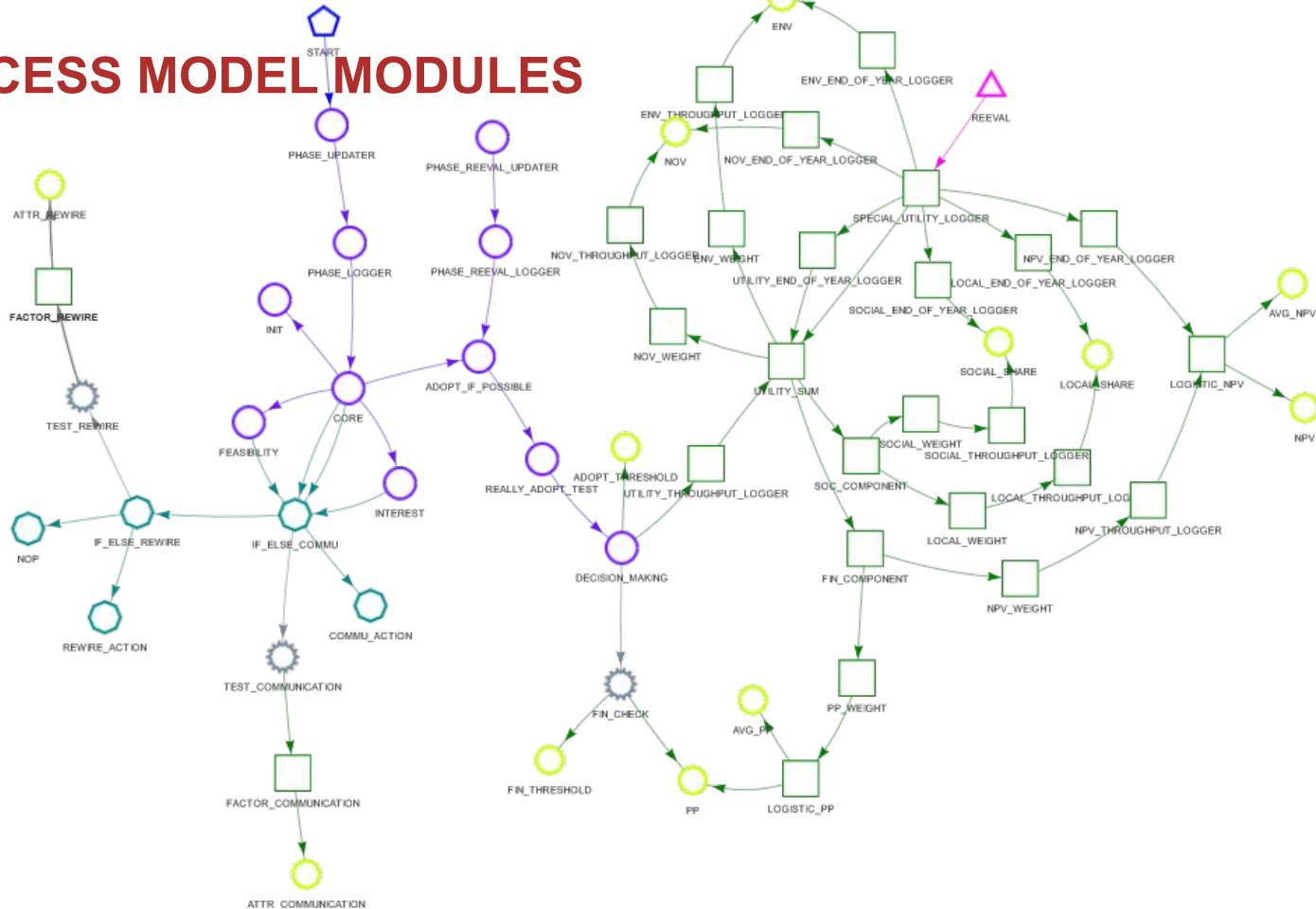
	INT	EC	NS	BA	BE	SN	GEN	EDU
EC	.343** (.382), N=7							
NS	.475** (.46), N=4	.445** (.187), N=4						
BA	-.111 (.306), N=4	-.172* (.397), N=3	-.015 (.13), N=1					
BE	.53** (.334), N=5	.693** (.366), N=4	.636** (.458), N=3	-.185** (.102), N=3				
SN	.326** (.291), N=4	.283** (.293), N=4	.504** (.752), N=2	-.104 (.528), N=2	.491** (.429), N=3			
GEN	-.01 (.084), N=2	.049** (.082), N=2	0 (0), N=0	-.038 (.463), N=1	0 (0), N=0	-.059** (.086), N=1		
EDU	.046 (.287), N=3	.047 (.126), N=3	0 (0), N=0	-.035 (.234), N=2	-.006 (.27), N=1	.068** (.082), N=2	-.086** (.084), N=2	
INC	.183 (.499), N=3	.15** (.219), N=3	0 (0), N=0	.002 (.333), N=2	.085 (.687), N=1	.037 (.189), N=2	-.096** (.084), N=2	.194 (.508), N=3

Upper number: Pearson's r with significance level (*: p<.1; **: p<.05); Number in brackets: width of 95% CI;
N: number of studies

INT Intention; EC Environmental concern; NS Novelty Seeking; BA Barriers; BE Benefits; SN Social Norm;
GEN Gender; EDU Education; INC Income



PROCESS MODEL MODULES



PHASE 1: AWARENESS

- Condition: None
- Operation each time step:
Level of interest \geq interest threshold?

No Action module

Yes Phase 2

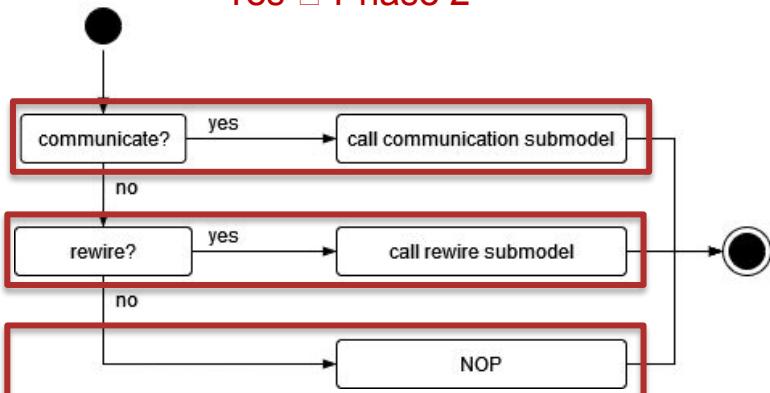


Abb. 1: Action module

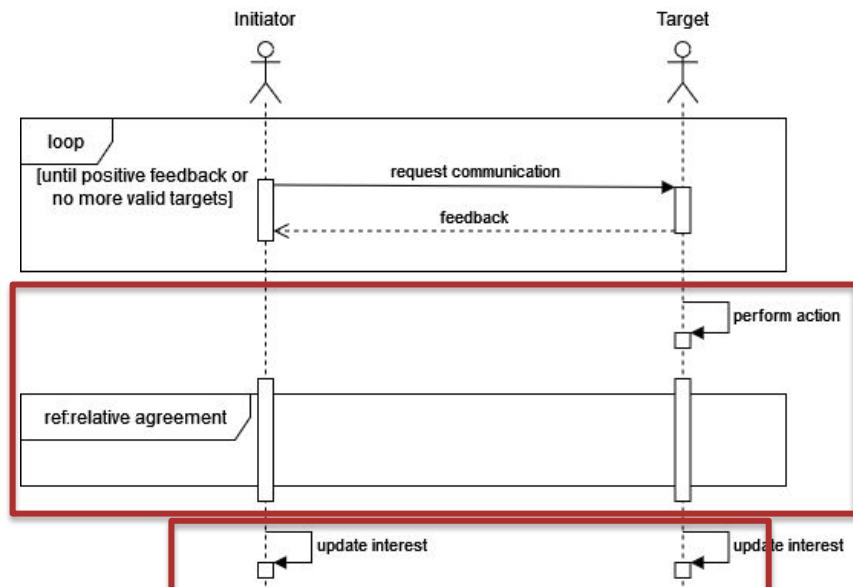


Abb. 2: Communication sub module



PHASE 3: EVALUATION

4. Calculate the weighted utility $U(i)$ based on weights w and partial utility $U_k(i)$

$$U(i) = w_f * U_f(i) + w_{soc} * U_{soc}(i) + w_l * U_l(i) + w_{ec} * U_{ec}(i) + w_{ns} * U_{ns}(i)$$

Financial Social Local Environment Innovativeness

In SUSIC project: empirically determined weights

$$U(i) = 0,59 * U_f(i) + 0,01 * U_{soc}(i) + 0,16 * U_l(i) - 0,10 * U_{ec}(i) + 0,34 * U_{ns}(i)$$



COMMUNICATION: RELATIVE AGREEMENT

- Communicating agents change their values for ENV and NS based on their counterparts view
- Relevant with that: opinions and uncertainty
- Agents with extreme opinions have low uncertainty and can't be influenced that strongly / don't influence others that strongly
- Level of uncertainty is adjusted after communication (12,5 % extremists)

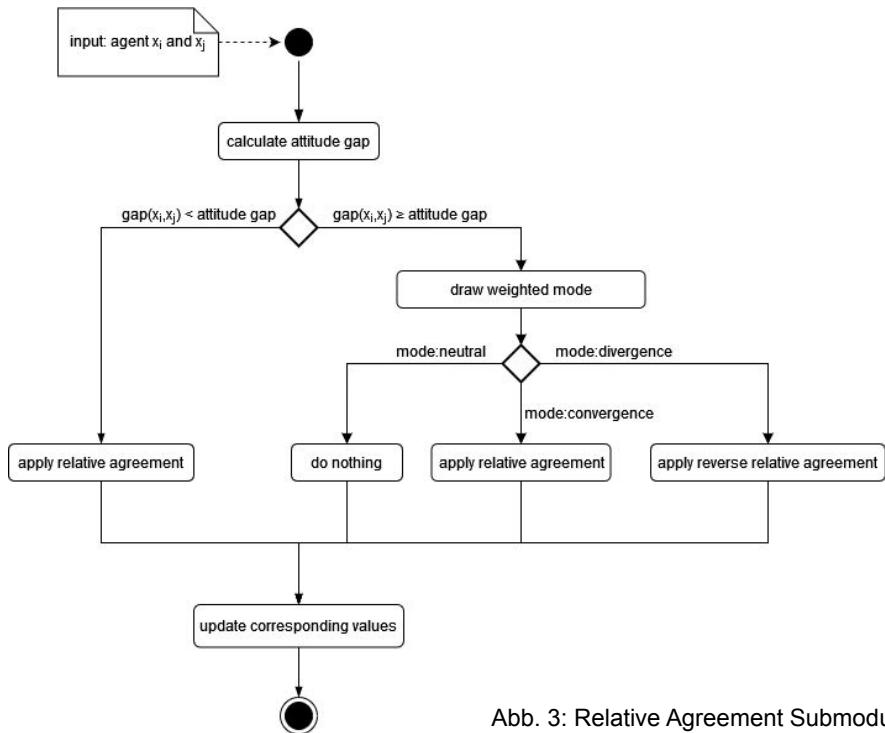


Abb. 3: Relative Agreement Submodul



PHASE 2: FEASIBILITY

- **Condition:** Interest level \geq interest threshold
- **Operation** in each step:
 - Check if agent has decision authority over the roof:
 - (1) Agent = Owner „Private“
 - AND
 - (2) Agent = 1-2 Household housing: (semi-)detached house

Agents with decision authority \rightarrow Phase 3 (Evaluation)

Agents without decision authority \rightarrow Phase 5 (Unable)



PHASE 3: EVALUATION

- **Condition:** Decision authority
- **Operations** each timestep:
 1. Calculate the weighted utility $U(i)$ based on weights w and partial utilities $U_k(i)$
 2. Check if $U(i) > Adoption\ threshold$
 3. Check if $E_k(i) > Financial\ threshold$
 4. (2) and (3) hold?
 - Yes Phase 4 (Adopter)
 - No Phase 6 (Persisting)

Adoption threshold: free parameter

Financial threshold: Empirically derived; adjusted to case study Leipzig (38.827 €)



PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

Financial Utility of Agent i

1. Calculation of agent- and year specific net present value of a 1 kW_{peak} PV system

$$NPV(t_0, N_i, A_i) = -I_{0,t_0} + \sum_{t=1}^{t_{FIT}=20} \frac{(FIT_{t_0} * (1 - SC) + RP_{t_0} * (1 + p)^t * SC) * E_t}{(1 + r_{dep,t_0})^t}$$

I_{0,t_0} = Net system price at time of calculation (€/kW_{peak})

FIT_{t_0} = Feed – in tarifs at time of calculation (€/kWh)

SC = Self – consumption = 30%

RP_{t_0} = Electricity price at time of calculation

p = Electricity price increase/yr = 0,03132864

E_t = Yearly generation yield in year t

r_{dep,t_0} = Reference interest rate for saving deposit at time of calculation

- Techno-economic parameters in the year of decision relevant



PHASE 3: EVALUATION

Berechnung der gewichteten Nutzwerts $U(i)$ anhand der Gewichte w und dem Teilnutzen $U_k(i)$

$$U(i) = w_{fin} * U_{fin}(i) + w_{soc} * U_{soc}(i) + w_{lok} * U_{lok}(i) + w_{ec} * U_{ec}(i) + w_{ns} * U_{ns}(i)$$

Im SUSIC Projekt: empirisch ermittelte Gewichte

$$U(i) = 0,59 * U_f(i) + 0,01 * U_{soc}(i) + 0,16 * U_l(i) - 0,10 * U_{ec}(i) + 0,34 * U_{ns}(i)$$



PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

Financial Utility of Agent i

1. Calculation of agent- and year specific net present value of a 1 kW_{peak} system

$$E_t = H_{solar_i}(N_i) * V(A_i) * \eta_{t_0} * (1 - D)^t * PR_{t_0}$$

$H_{solar_i}(N_i)$ = Global radiation per m² with angle N_i (kWh/a)

$V(A_i)$ = Factor for orientation, 1 – (loss for rooftop orientation) (%)

η_{t_0} = Module efficiency at time of calculation (%)

D = Degradation/year = 0,5%

PR_{t_0} = Performance Ratio, 1 – (Losses during operation) (%)

- Agent-specific roof angle and orientation relevant



PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

Financial Utility von Agent i

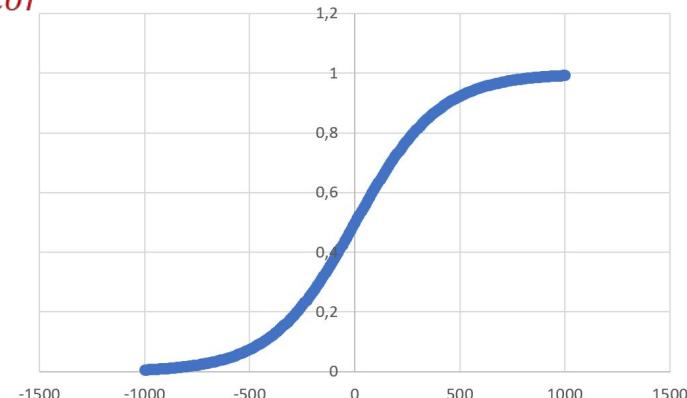
1. Calculation of agent- and year specific net present value of a 1 kW_{peak} system

$$U_f(i) = \frac{1}{1 + e^{-k * (NPV(t_0, N_i, A_i) - NPV_{av})}}$$

$-k = \text{Logistic faktor}$

$NPV_{av} = \emptyset NPV$

- Utilities between 0 and 1
- Average system: $U(i)=0,5$
- Below average system: $0 < U(i) < 0,5$
- Above average system: $0,5 < U(i) < 1$



PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

Social and local utility of Agent i

$$U_{loc}(i) = \frac{\text{Actual adopters}_{social}}{\text{Potential adopters}_{social}}$$

—

$$U_{loc}(i) = \frac{\text{Actual adopters}_{local}}{\text{Potential adopters}_{local}}$$

The social environment includes all agents that are connected to agent i via an edge in the graph

The spatial environment contains all agents that are within the radius of \max_2 of the current agent
 $\max_2 = \text{Distance filter}$

- Distribution in the spatial and social environment relevant: active and passive peer effect



PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

Environmental and innovativeness utility of agent i

$$U_{ec}(i) = ec(i)$$

—

$$U_{ns}(i) = ns(i)$$

ec(i) = environmental attitude agent i

ns(i) = Innovation attitude of Agent i

□ Personal motivation factors



PHASE 4, 5 AND 6: ADOPTER, UNABLE, PERSISTING

Phase 4: Adopter

Condition: $U(i) > \text{adoption threshold}$ and $E_k(i) > \text{financial threshold}$

Operation in a time step: like phase 1

Phase 5: Unable

Condition: Agent \neq Owner „Private“ and/or agent \neq 1-2 households

Operation in a timestep: like phase 1

Phase 6: Persisting

Condition: $U(i) < \text{adoption threshold}$ and/or $E_k(i) < \text{financial threshold}$

Operation in a timestep: like Phase 1

