



UNIVERSITÄT  
LEIPZIG

**Leipzig Data Week 2024**

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

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

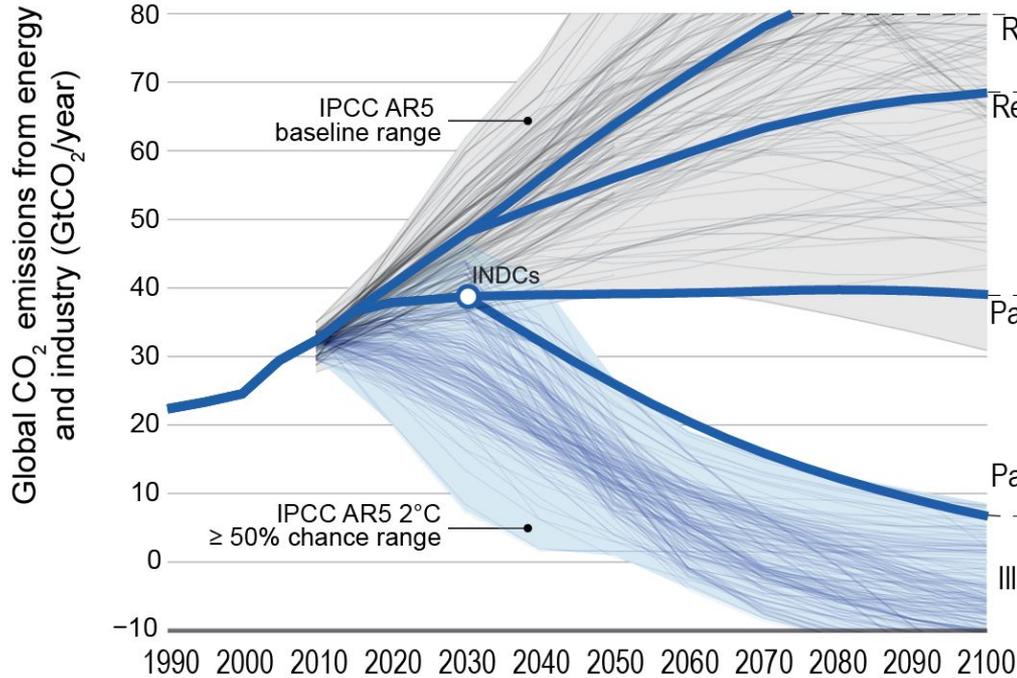
Simon Johanning

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

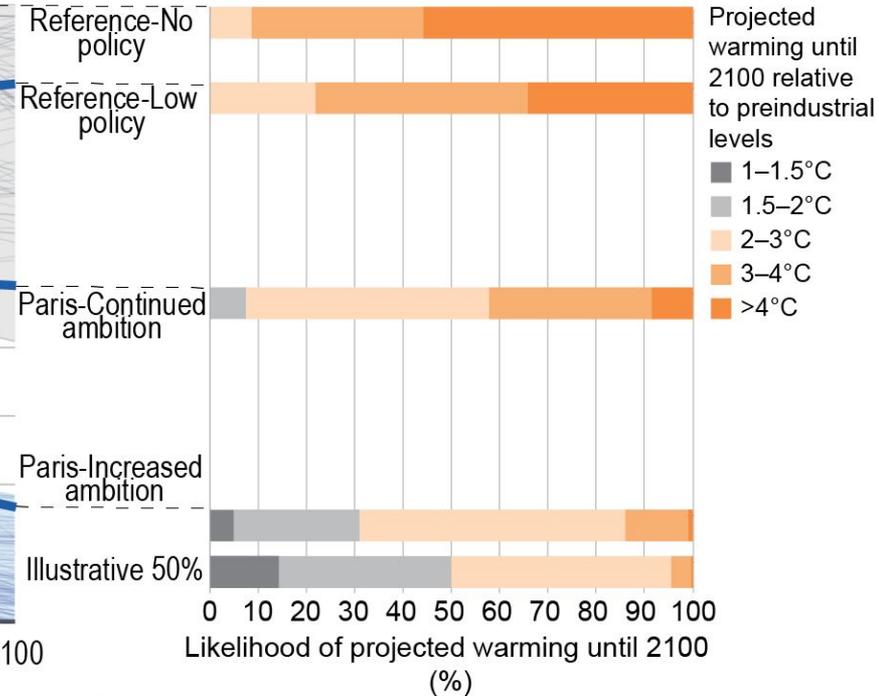
**TEIL I:  
MODELLIERUNG  
KOMPLEXER  
SYSTEME**

# MOTIVATION: KLIMAWANDEL & DEKARBONISIERUNG

(a) Emissions pathways



(b) Temperature probabilities



➔ Notwendigkeit zur Infrastrukturtransformation

Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=69337764>,

A.A. Friedell, G.C. Orr, L.E. Clarke, J.A. Edmonds, M.E. Hoesung, S.C. Mubarek, J. Rogelj, R. Steiner, J. Thomson, G.R. Amey, J. Crosson, M. Jiang, J. McFarland, A. Meinke, and W. Shi, 2015. Can Paris pledges meet some climate change? Science, 350(6255):1088-1090. The figure content presented here is derived from the original as follows: For panel (a), the two lines representing the emissions trajectories were removed. For panel (b), the Substantive 50% likelihood projection was removed from the bottom of the chart. The source for the diagram given in the report is U.S. Global Change Research Program: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment (NSCA), Volume 1: Climate Change (https://www.gpo.gov/). Report number: EPA-600/R-15/002. EPA website: www.epa.gov/epa002004.

# MODELLE & ERWARTUNGEN

Rolle von Modellen bei Infrastrukturtransformation:

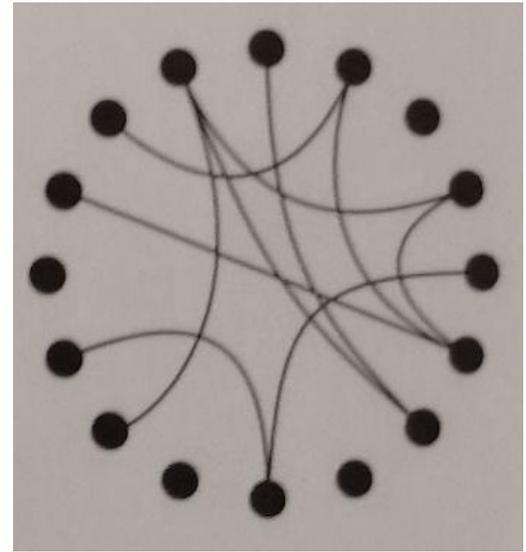
- Bestimmen von Transformationspfaden  
Große Linien, Szenarien, Rahmenbedingungen: Exploration
- Abwägen verschiedener Optionen & Instrumente (Politik & Unternehmen)  
Evaluation von Szenarien: Exploration
- Verständnis von Systemzusammenhängen  
System(verhaltens)analyse: Erklärung
- Vorhersage von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

# MODELLIERUNG KOMPLEXER SYSTEME

Interessante Systeme: **komplex**

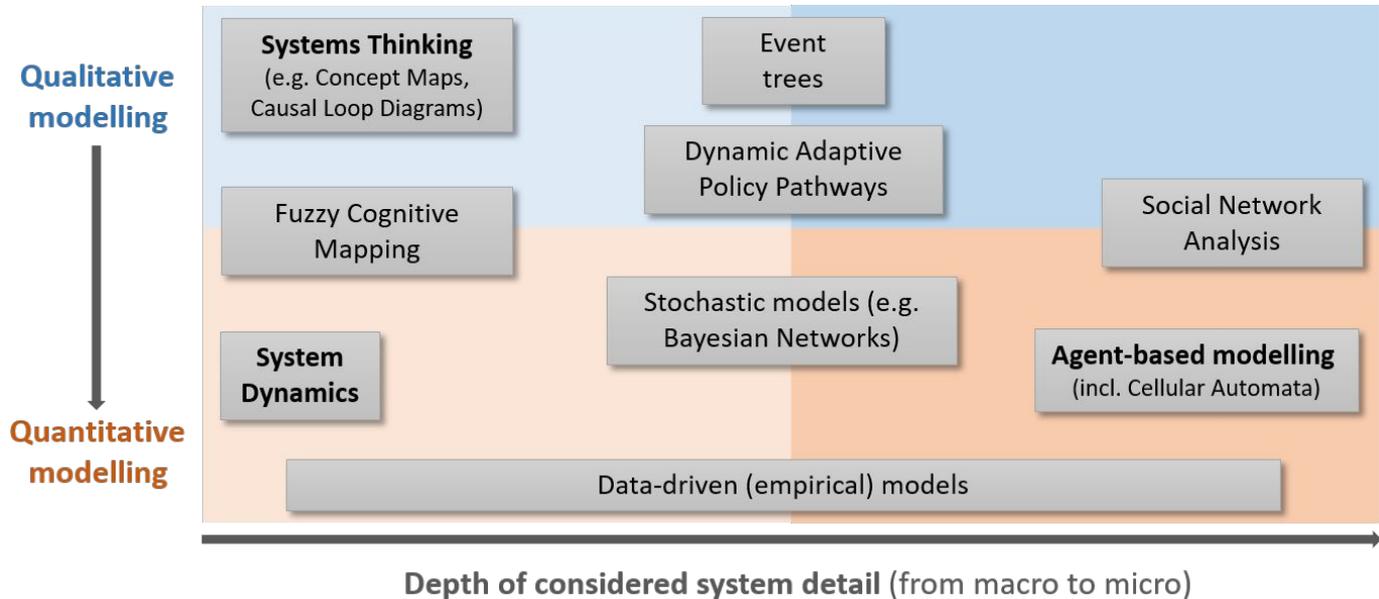
Charakteristika komplexer Systeme:

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



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

# 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

auf lösbare 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**

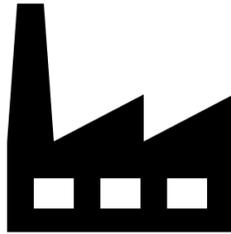
# MOTIVATION: ROLLE PRIVATER HAUSHALTE

2020: Anteil HH an Primärenergieverbrauch: 27.4%



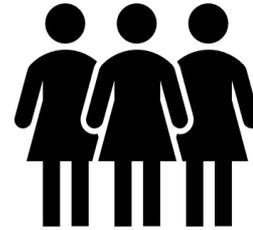
Politik & Verwaltung

‘direkter’ Einfluss  
(Demokratien)



profit-orientierte  
Unternehmen

rational choice:  
Setzen von Anreizen



NROs &  
not-for-profits

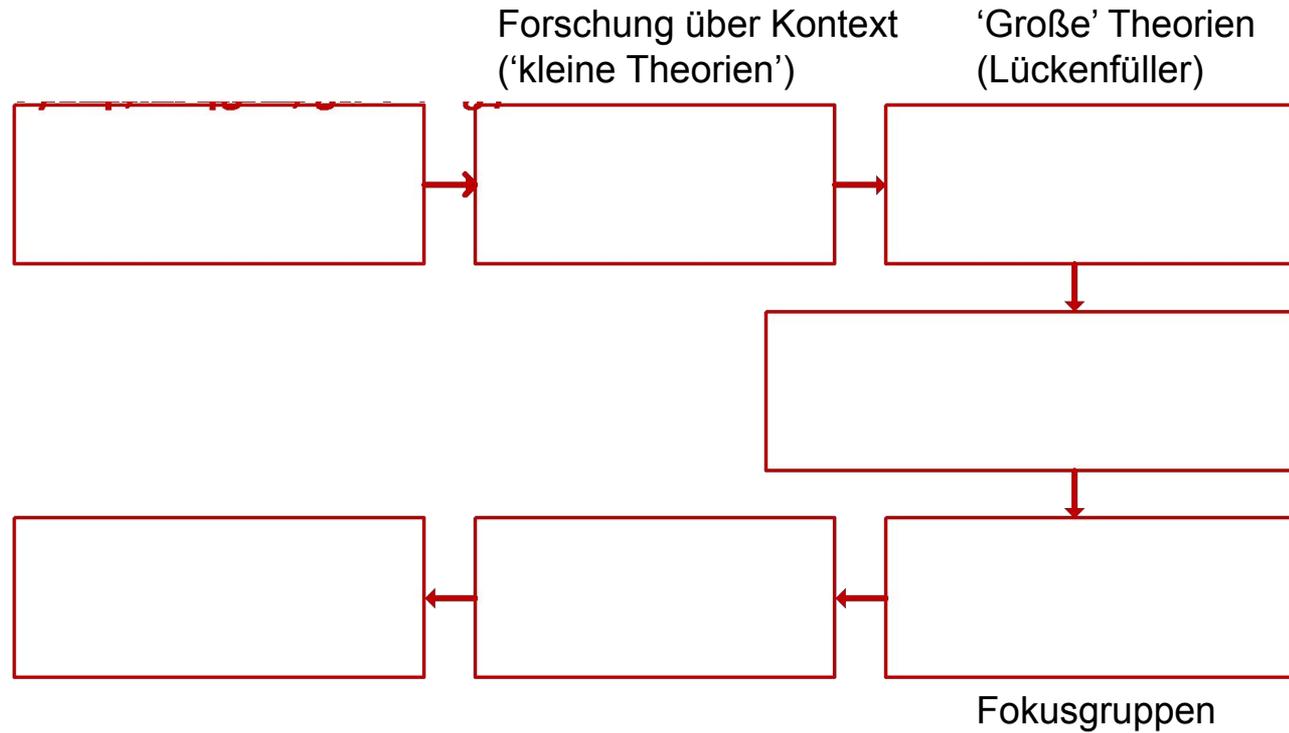
inhärente Motivation:  
Wertegeleitet



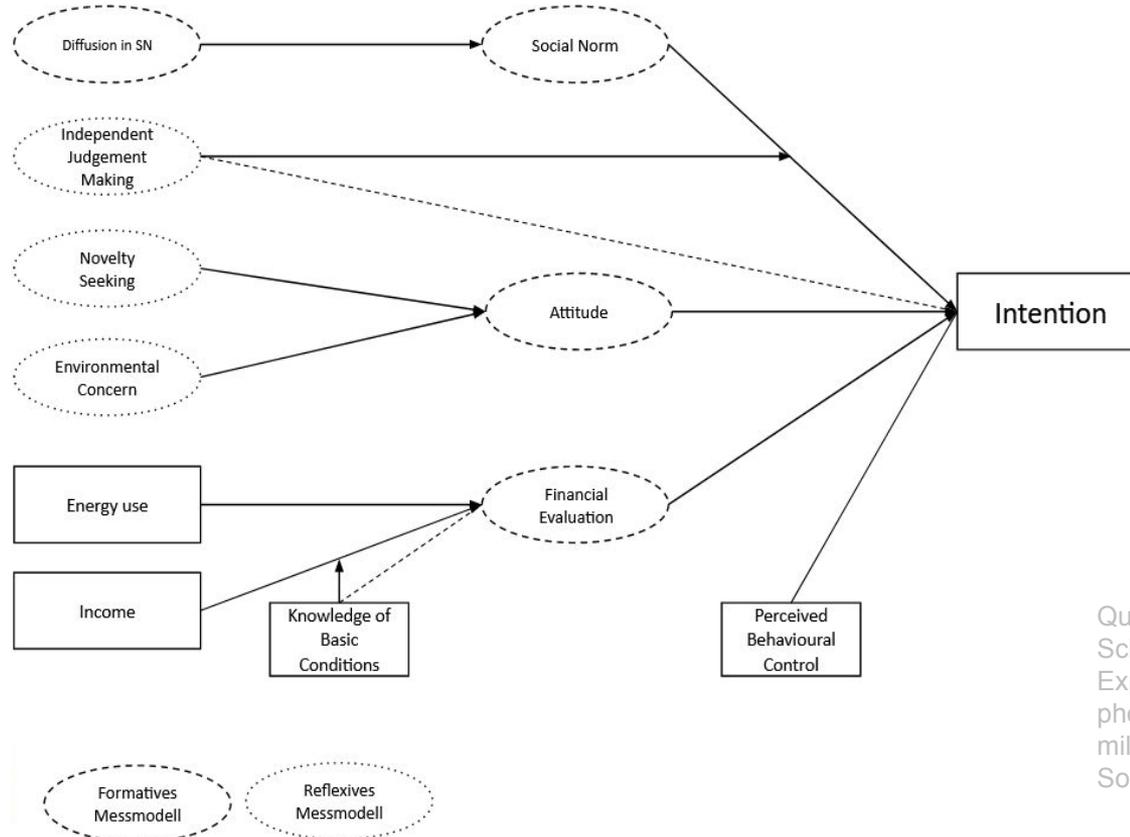
private  
Haushalte

Menschen:  
nicht-rationale, komplexe  
Entscheidungen

# KONZEPTGETRIEBENES VORGEHEN



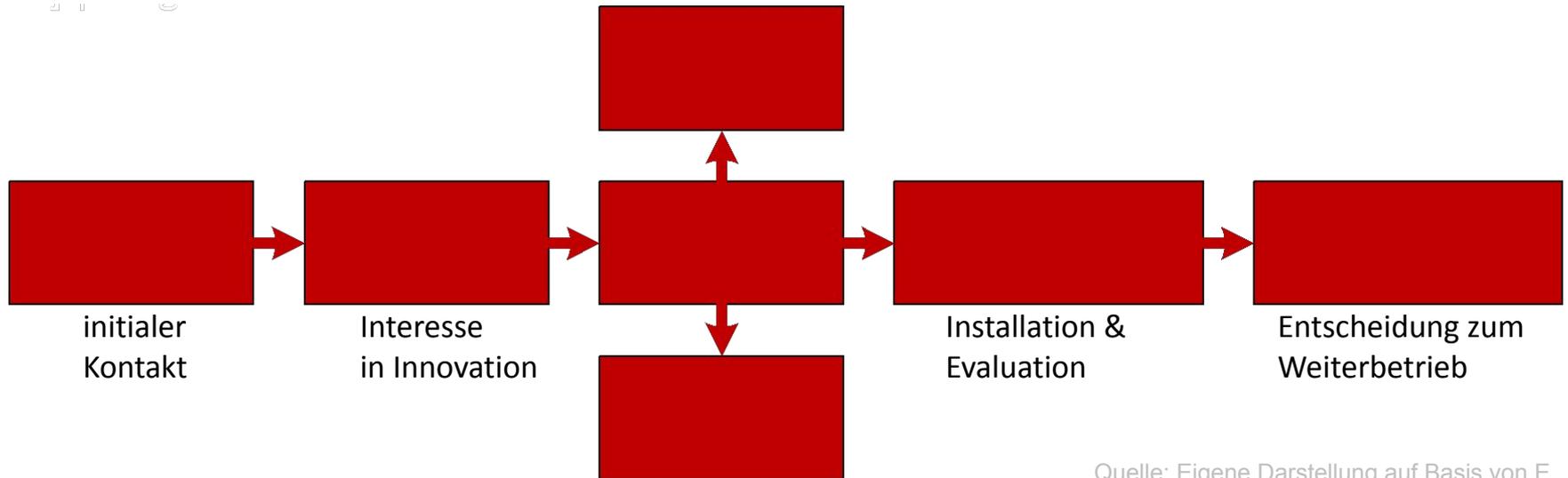
# STRUKTUR ENTSCHEIDUNGSFAKTOREN



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

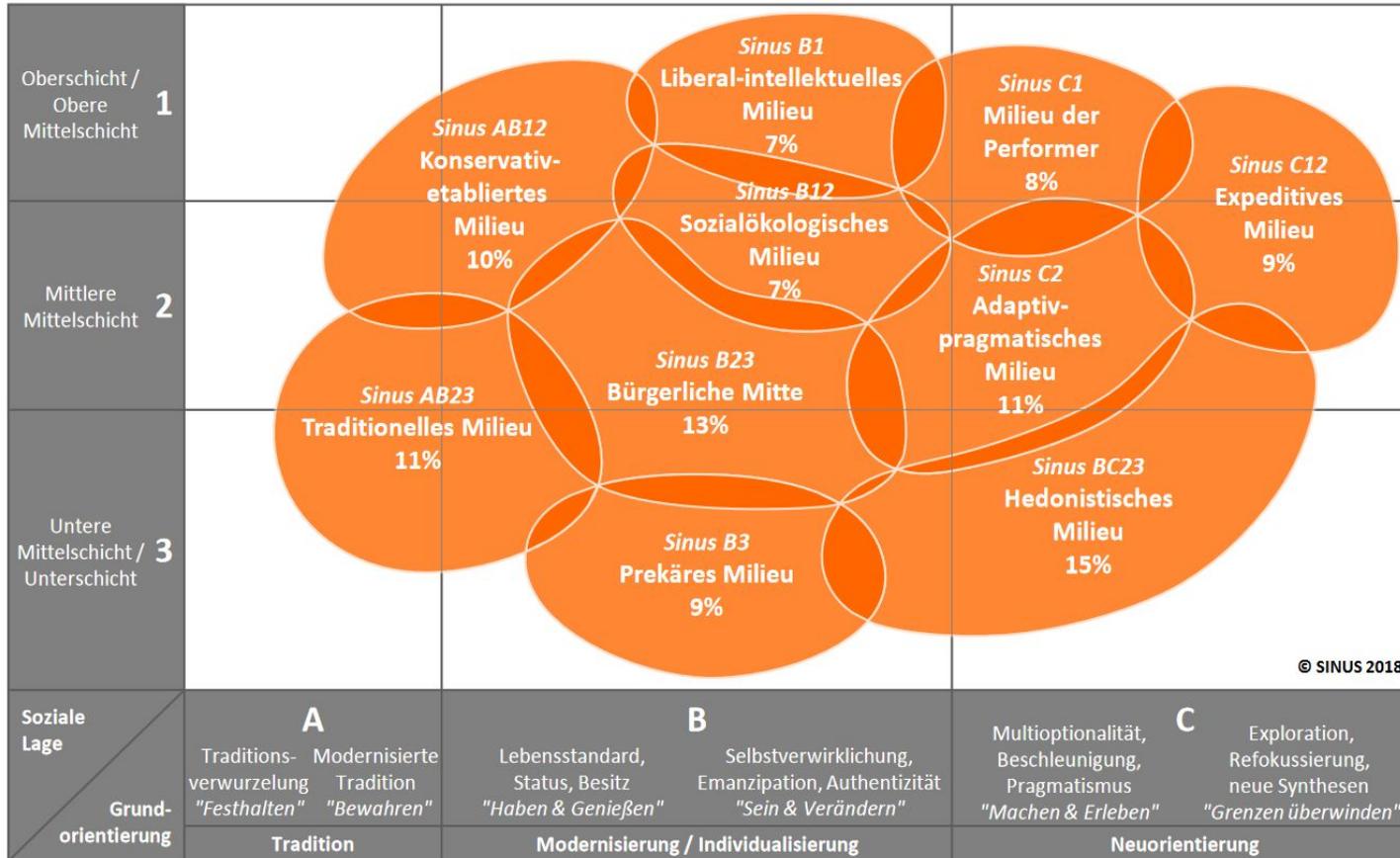
# DIFFUSION OF INNOVATION: PROZESS (ROGERS)

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



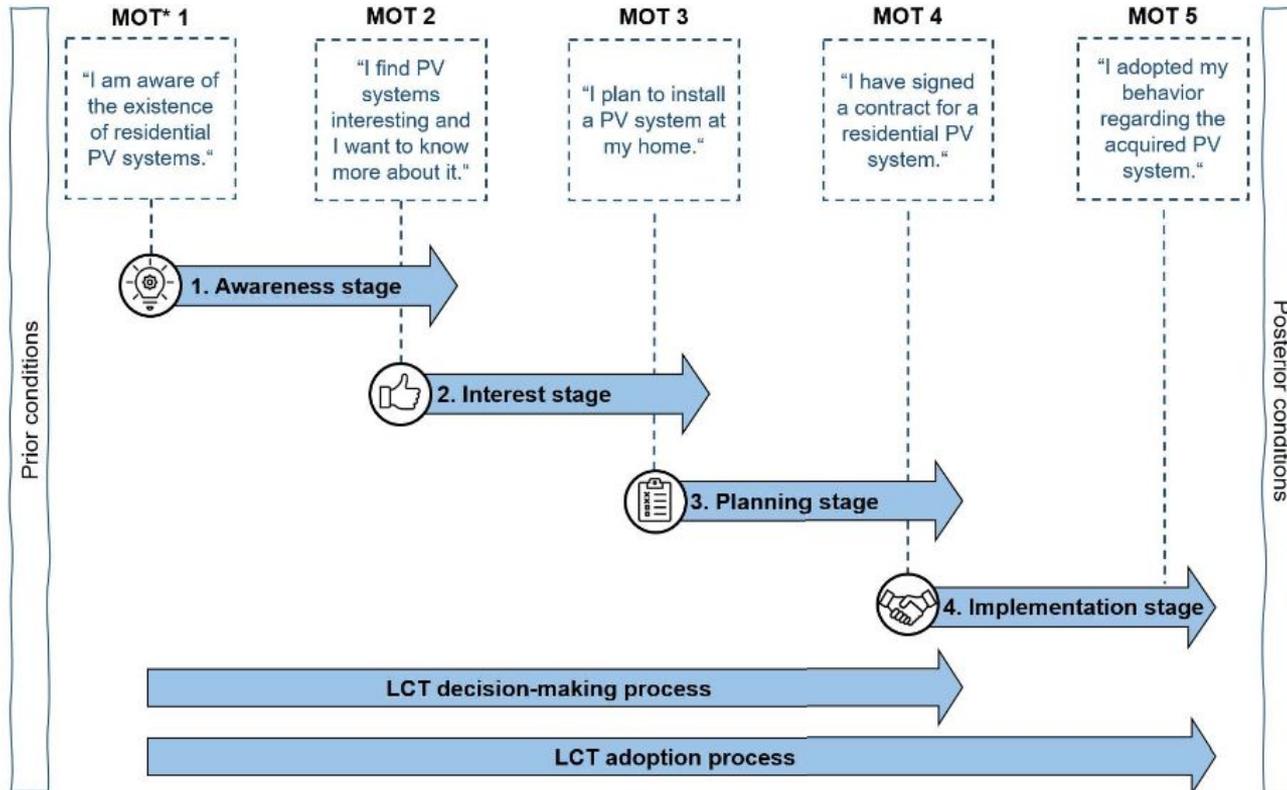
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von E. M. Rogers: Diffusion of innovations (5. Aufl.). New York: Free Press, 2003

# EXKURS: DIE SINUS MILIEU SEGMENTIERUNG 2018



Quelle: SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH

# FOKUSGRUPPEN



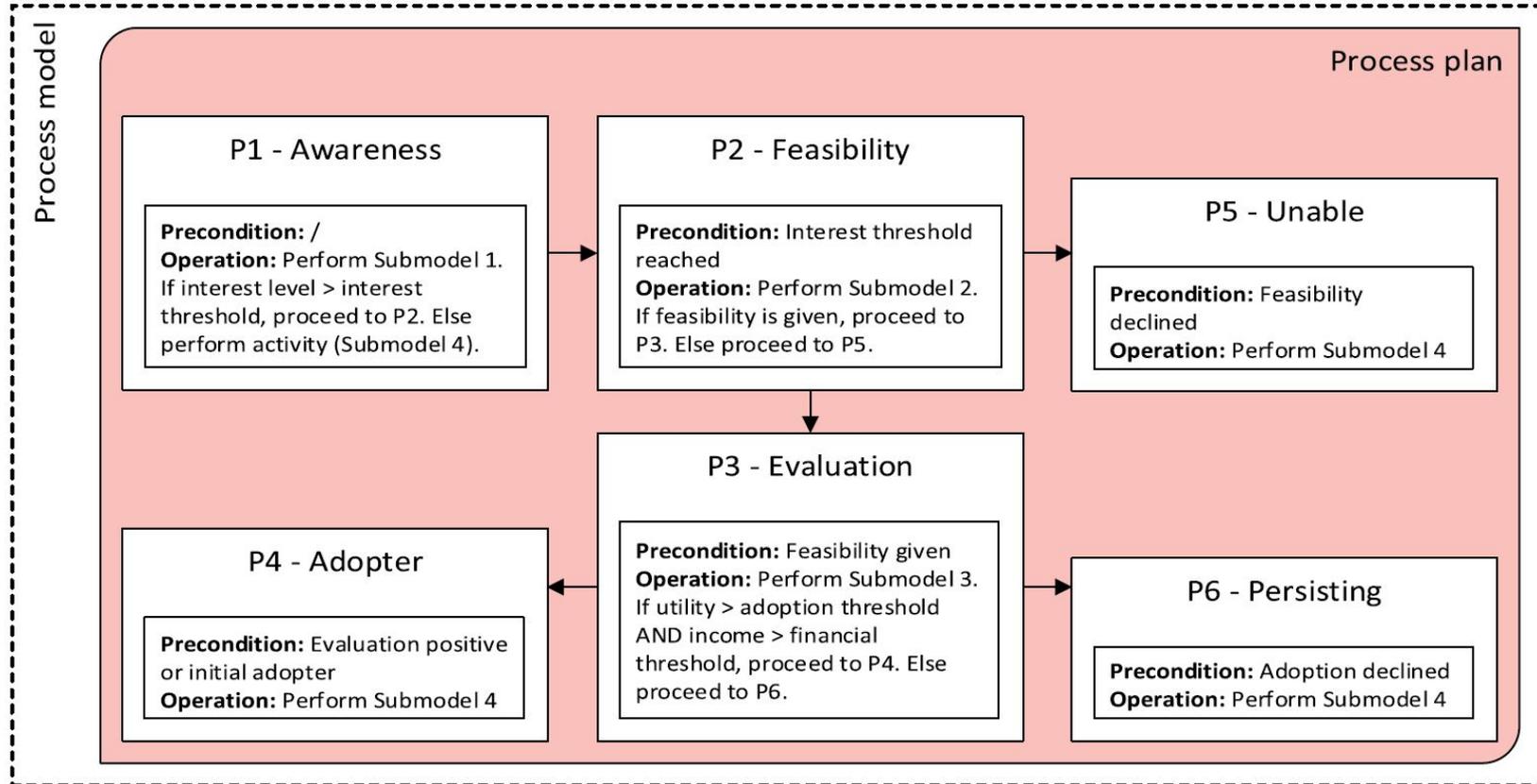
Bündlung ähnlicher Milieus,  
Abbildung aller

Ziel: Verständnis von  
Phasen, Einflussfaktoren &  
Entscheidungsvariablen

\* MOT = moment of truth

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

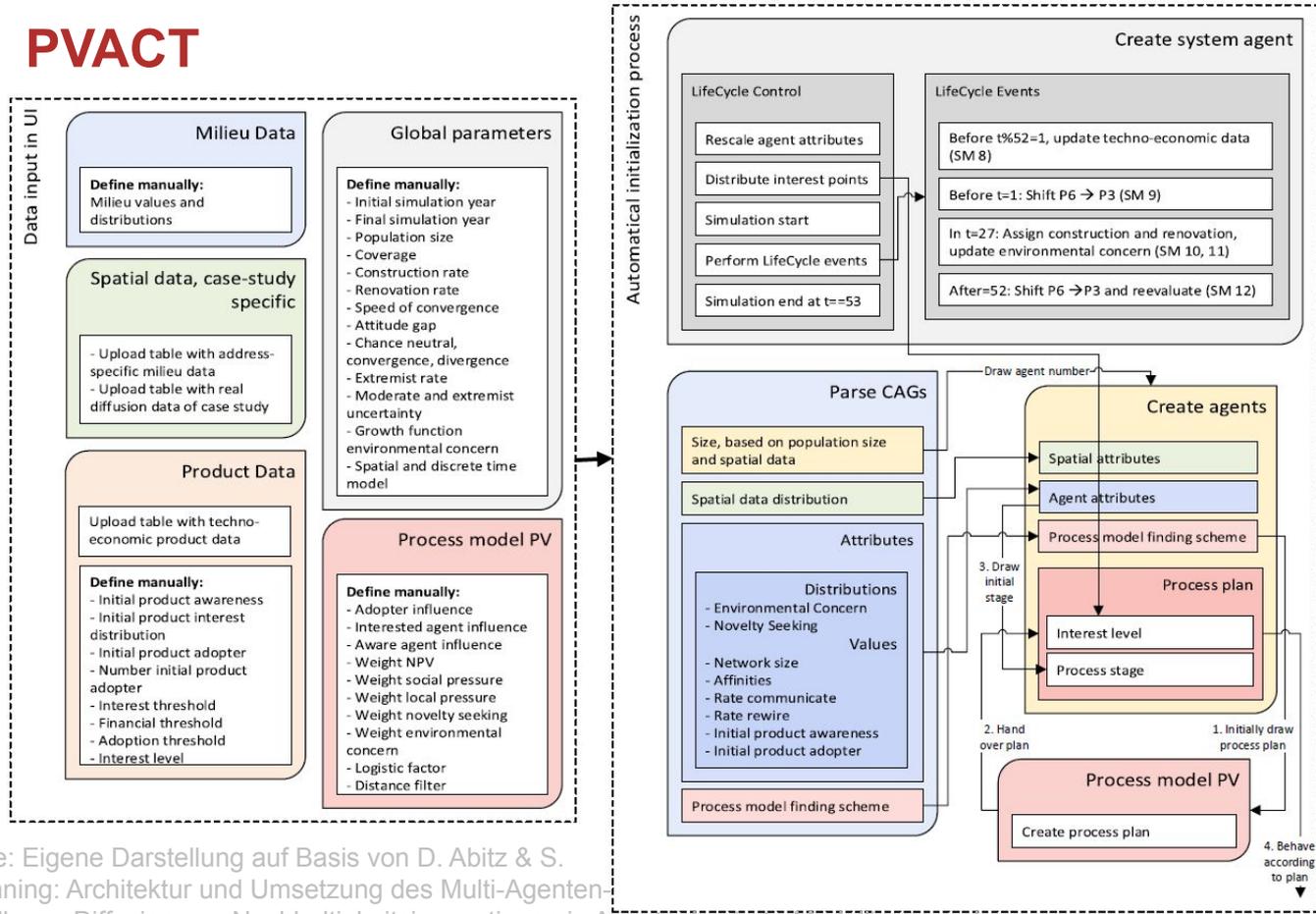


## PHASE 3: EVALUATION

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

$$U(i) = \underbrace{w_1}_{\text{Finanziell}} \cdot U_1(i) + \underbrace{w_2}_{\text{Sozial}} \cdot U_2(i) + \underbrace{w_3}_{\text{Lokal}} \cdot U_3(i) + \underbrace{w_4}_{\text{Umweltbew.}} \cdot U_4(i) + \underbrace{w_5}_{\text{Innovativität}} \cdot U_5(i)$$

# 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

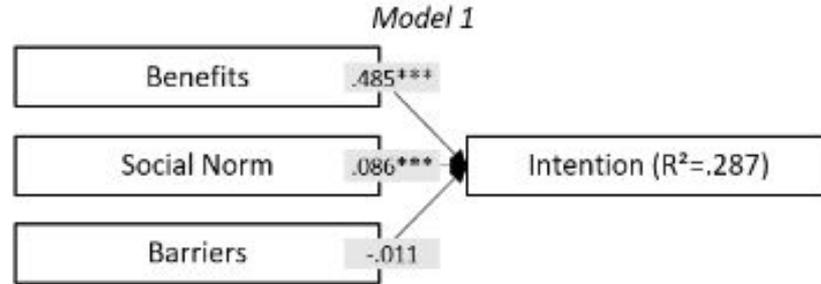
Information	Quelle	Größe Datensatz	Coverage (%)
Straße, Hausnummer, PLZ	Inspire Datensatz, Land Sachsen	60.197	100 %
Eigentümerinformationen 'Flurstück'	Stadt Leipzig	56.483	93,8 %
#Haushalten an Adresse	Microm	53.848	95,3 %
Dachorientierung & -neigung	3D-Stadtmodell, Stadt Leipzig	48.145	89,4 %
Kaufkraft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

Davon 318 gewerblich

# 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
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	
Anzahl Beobachtungen	1800				
F(5, 1794)	238,76				
p-Wert	<0,001				
R <sup>2</sup>	0,3996				

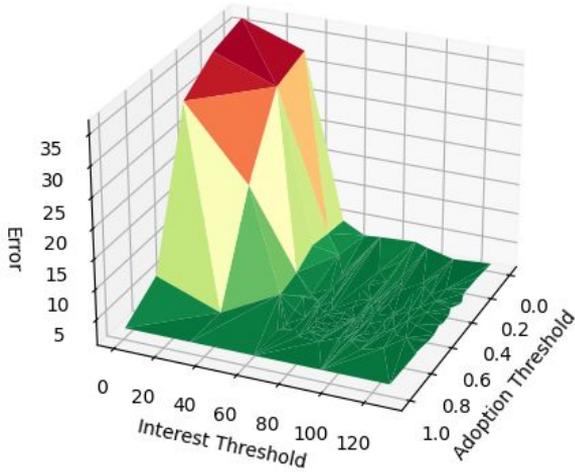
Ergänzung fehlender Parameter durch repräsentative Umfrage von Gebäudeeigentümern

Ableitung von Modellgewichten

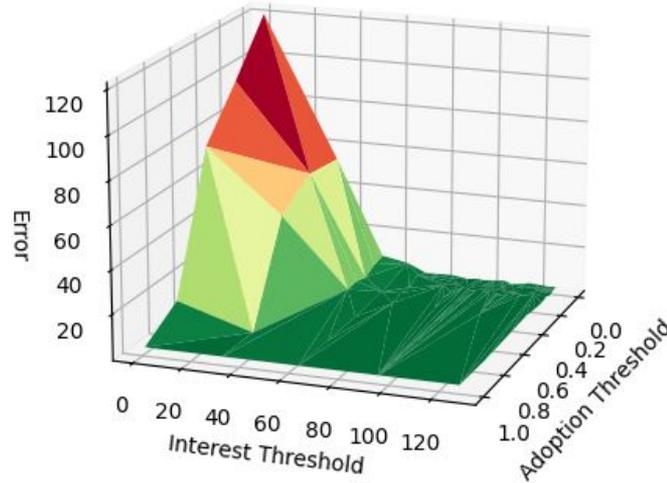
Datenvalidierung

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

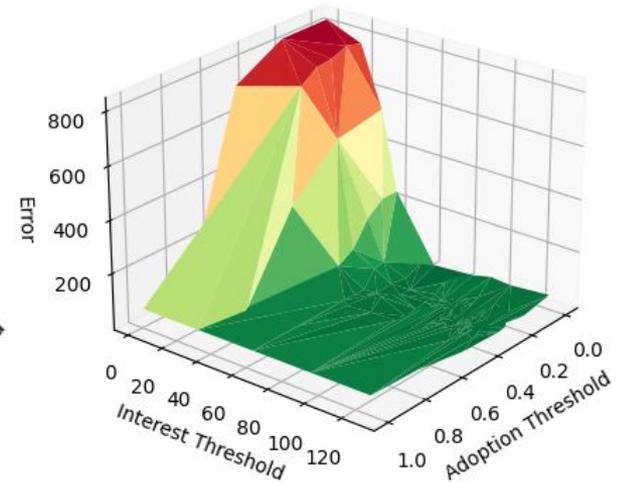
# KALIBRIERUNG DURCH FEHLERMINIMIERUNG



*Durchschnittliche  
Abweichung im Zubau*

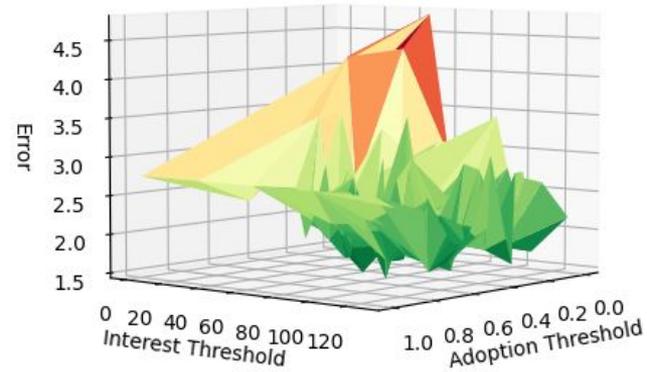


*Quadratische durchschn.  
Abweichung im Zubau*

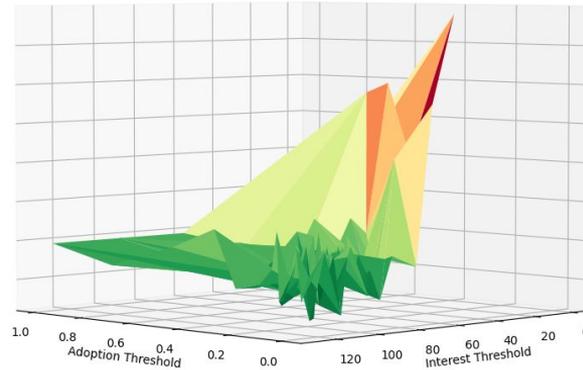


*Durchschn. Abweichung in  
Anzahl Gesamtanlagen*

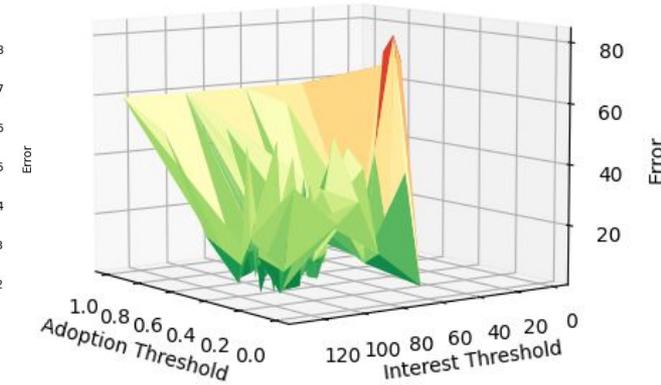
# KALIBRIERUNG DURCH FEHLERMINIMIERUNG: GENAUERER BLICK



*Durchschnittliche  
Abweichung im Zubau*



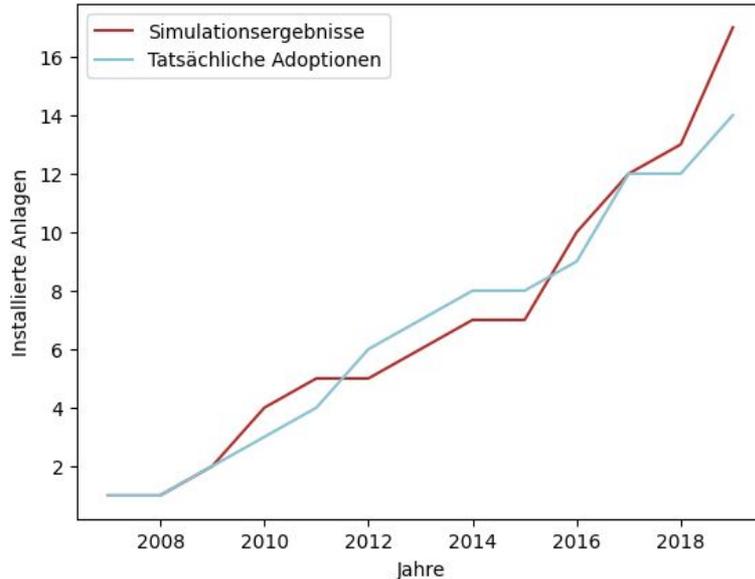
*Quadratische durchschn.  
Abweichung im Zubau*



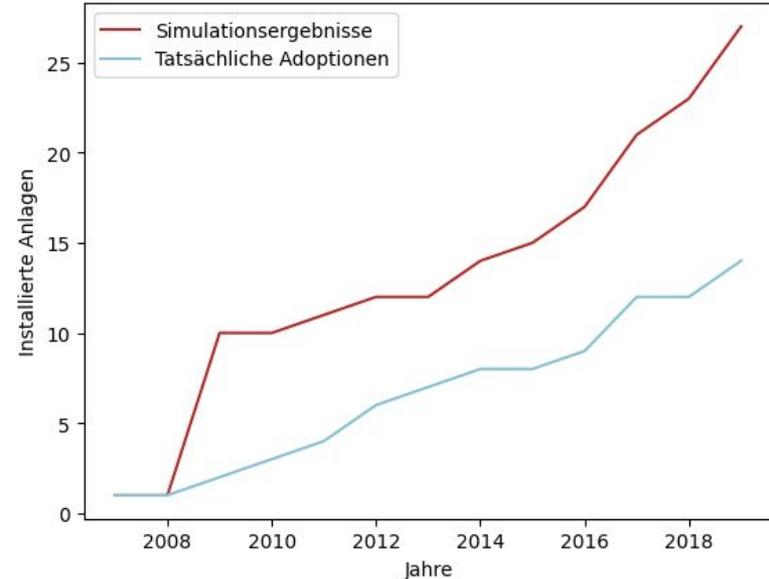
*Durchschn. Abweichung in  
Anzahl Gesamtanlagen*

# 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

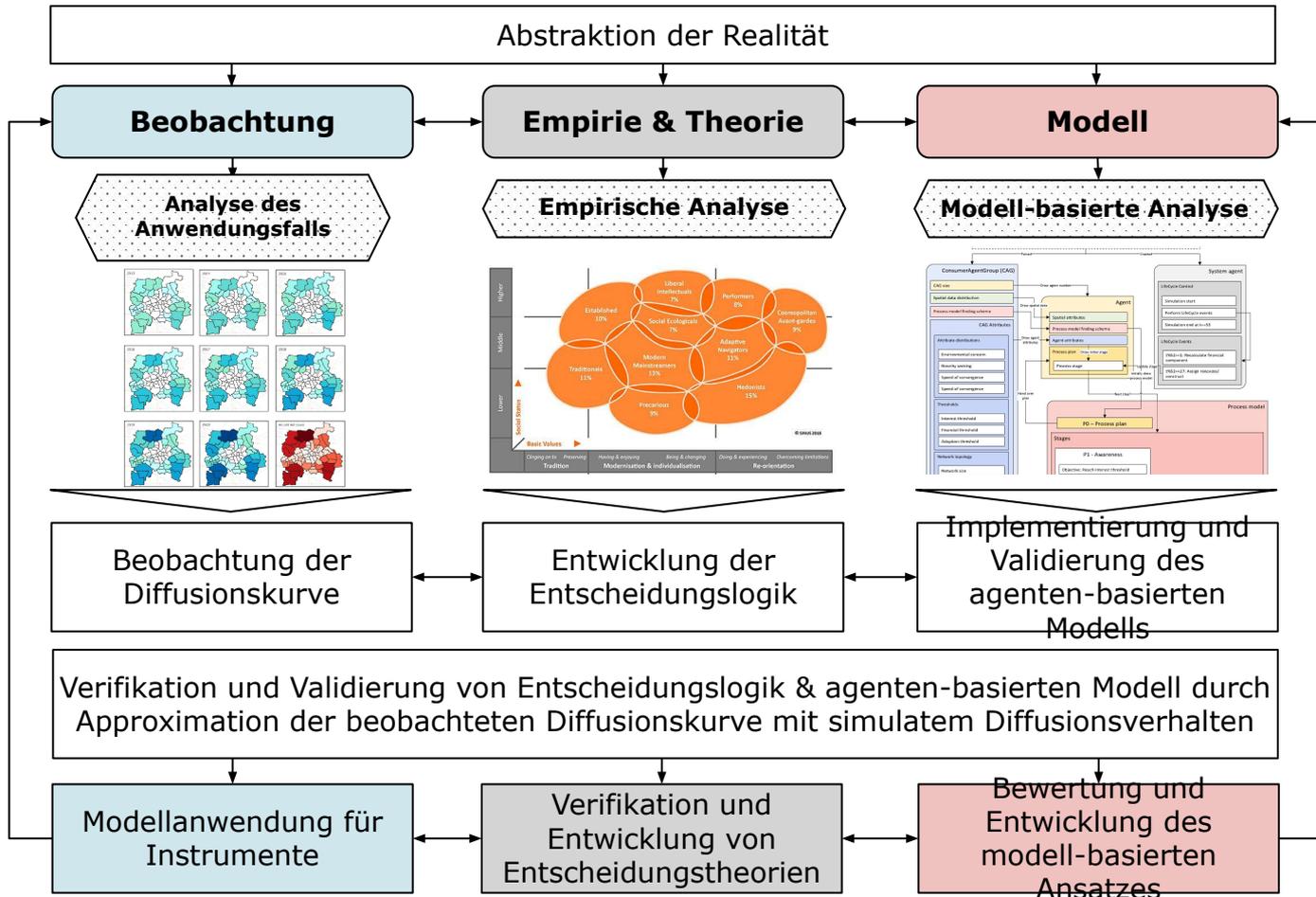
[johanning@wifa.uni-leipzig.de](mailto:johanning@wifa.uni-leipzig.de)

[www.wifa.uni-leipzig.de/iirm](http://www.wifa.uni-leipzig.de/iirm)



**Energiemanagement &  
Nachhaltigkeit**





Quelle: Eigene Darstellung F. Scheller

# HUMAN DECISION MAKING

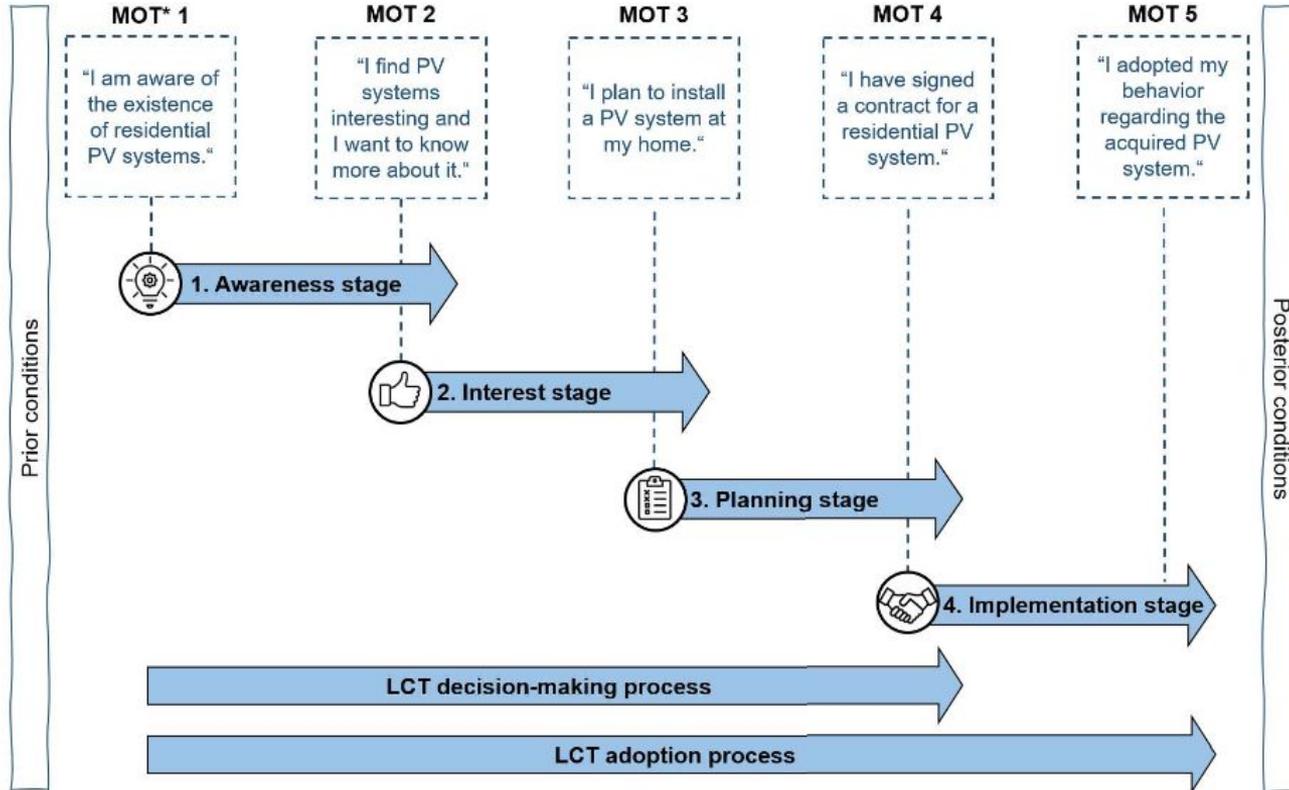
multitude of decision factors:

- 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



\* MOT = moment of truth

- 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

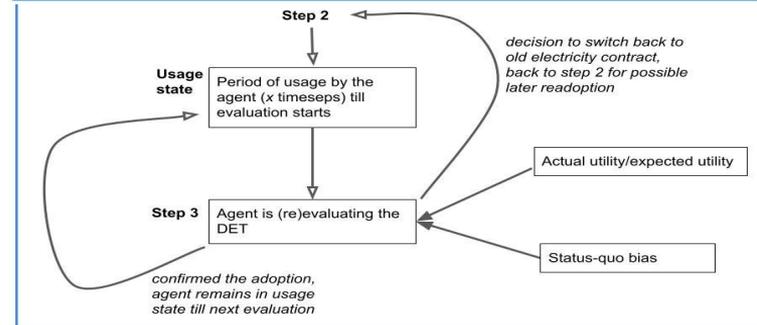
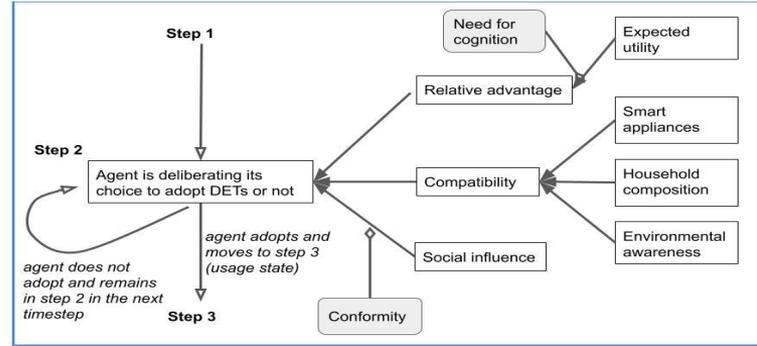
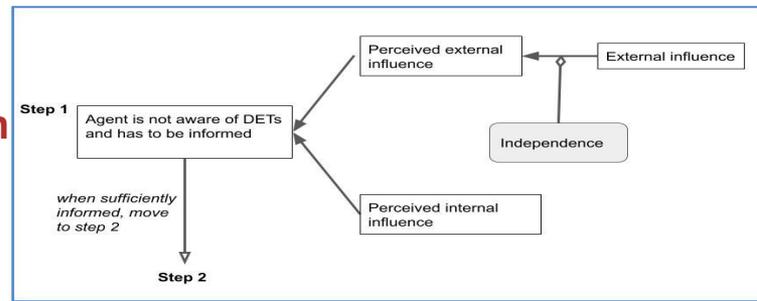
# DETACT Dynamic Electricity Tariffs and interACTION

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

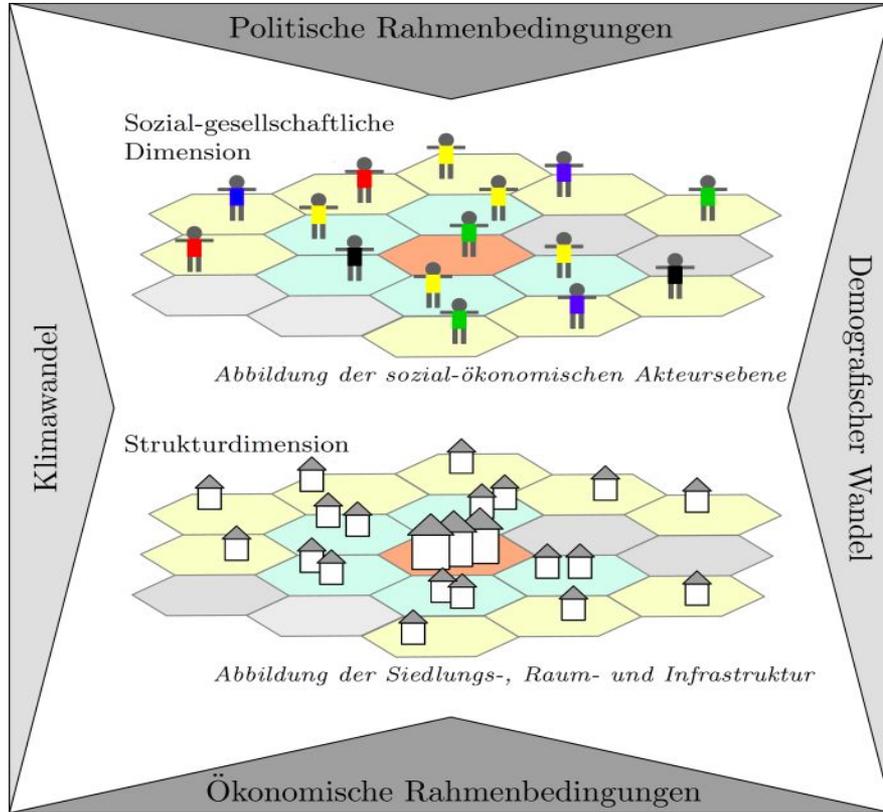
decarbonization in **heat sector** critical and slow

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

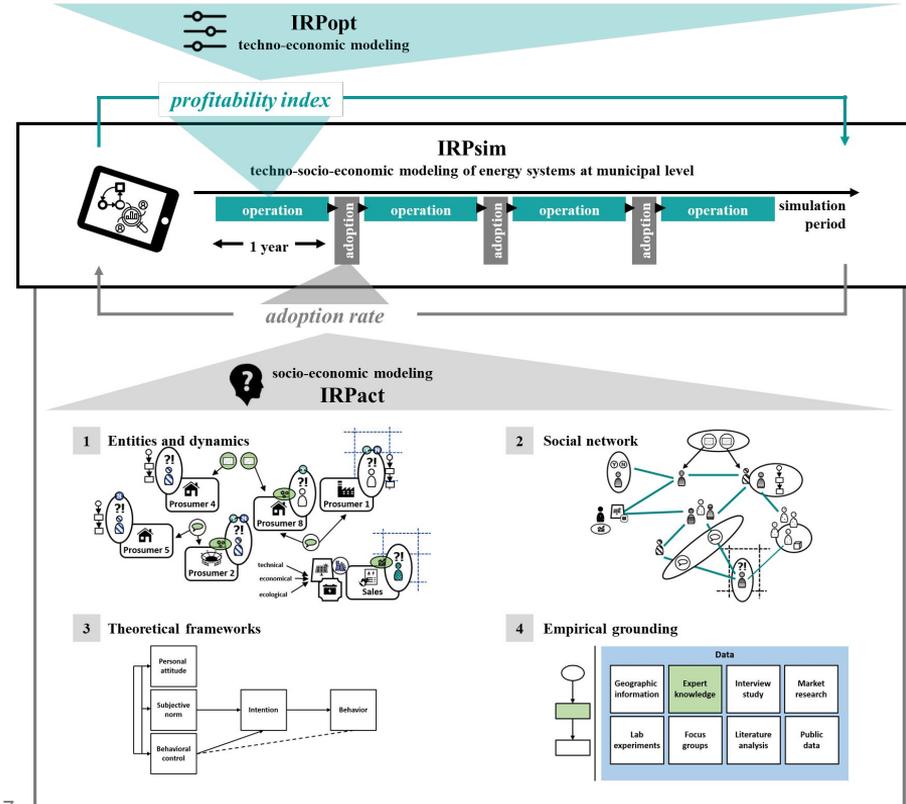
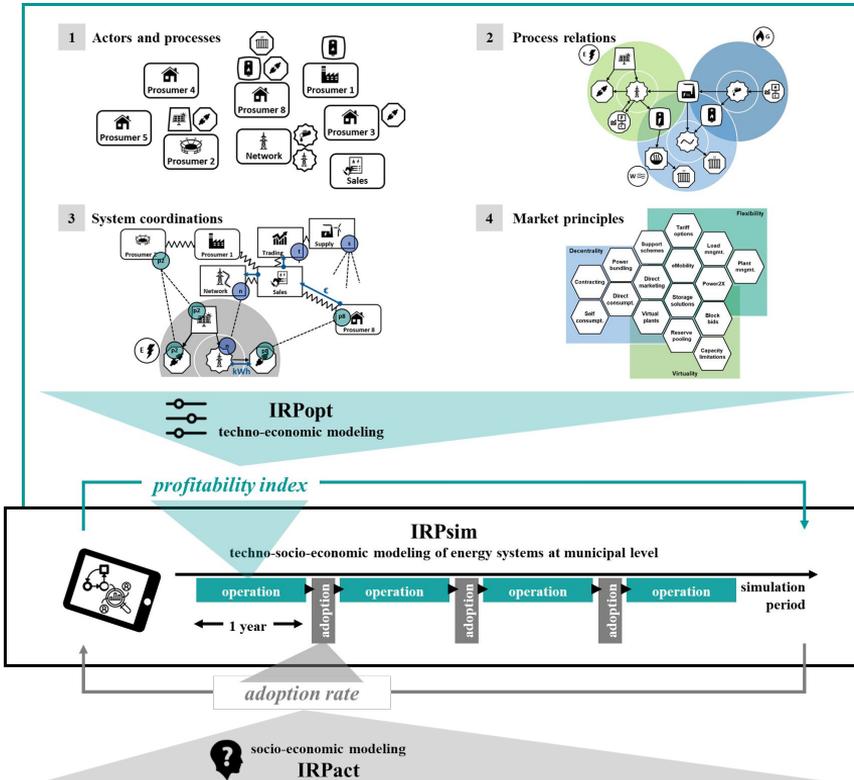
→ **multiple perspectives** required

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

common structures, but contextual factors

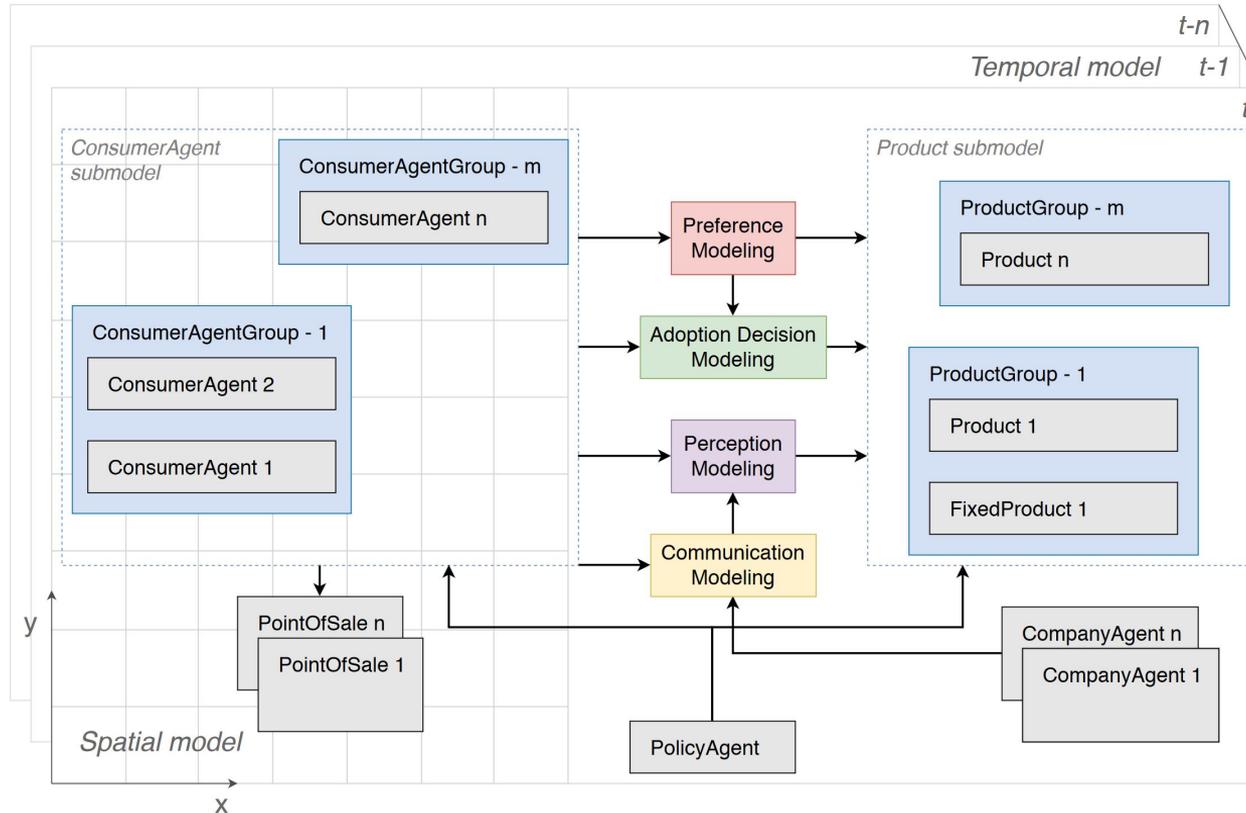
→ requires a model **framework** and contextually **specific models**

# 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

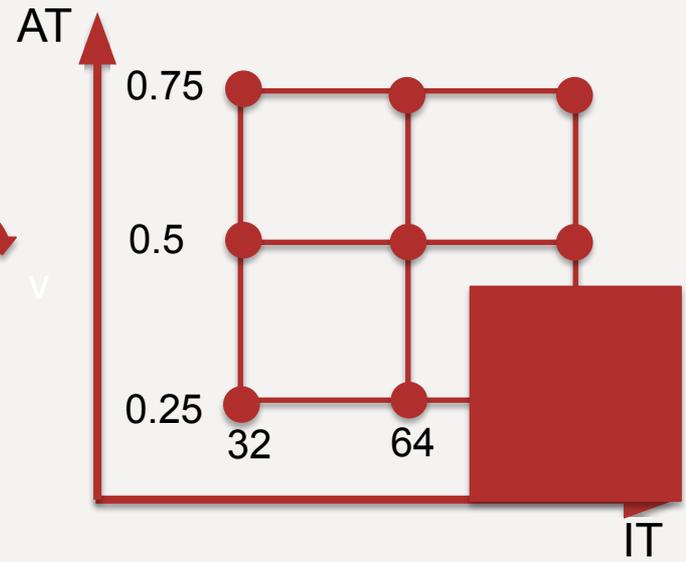
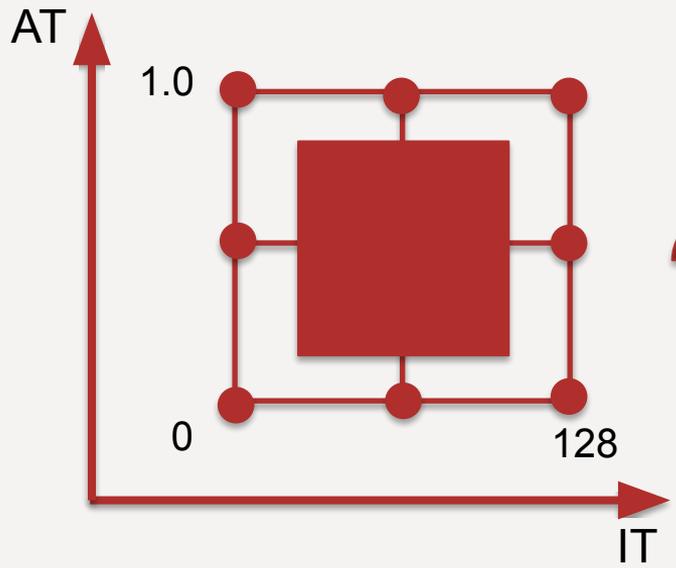
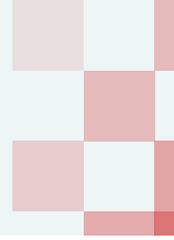
- ▶ Same seed means same exact sequence of events
- ▶ Model *executions* are (kind of) deterministic, making them comparable



## 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  $P_{ijk}$

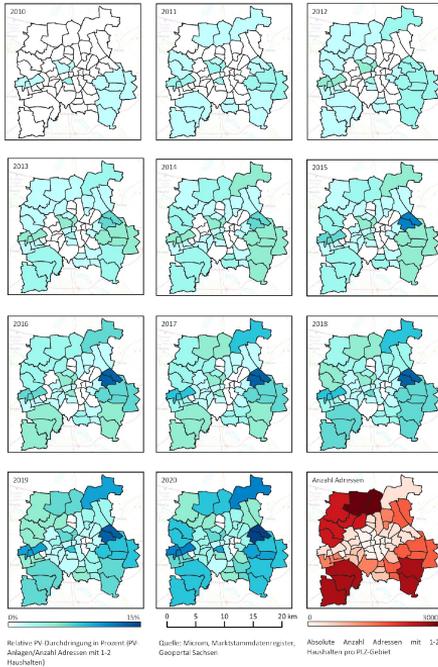
**Run model for all instances**

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

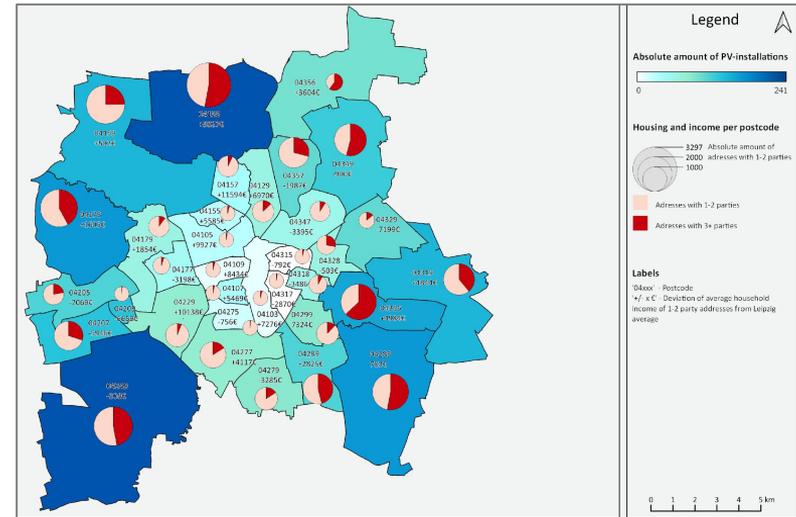
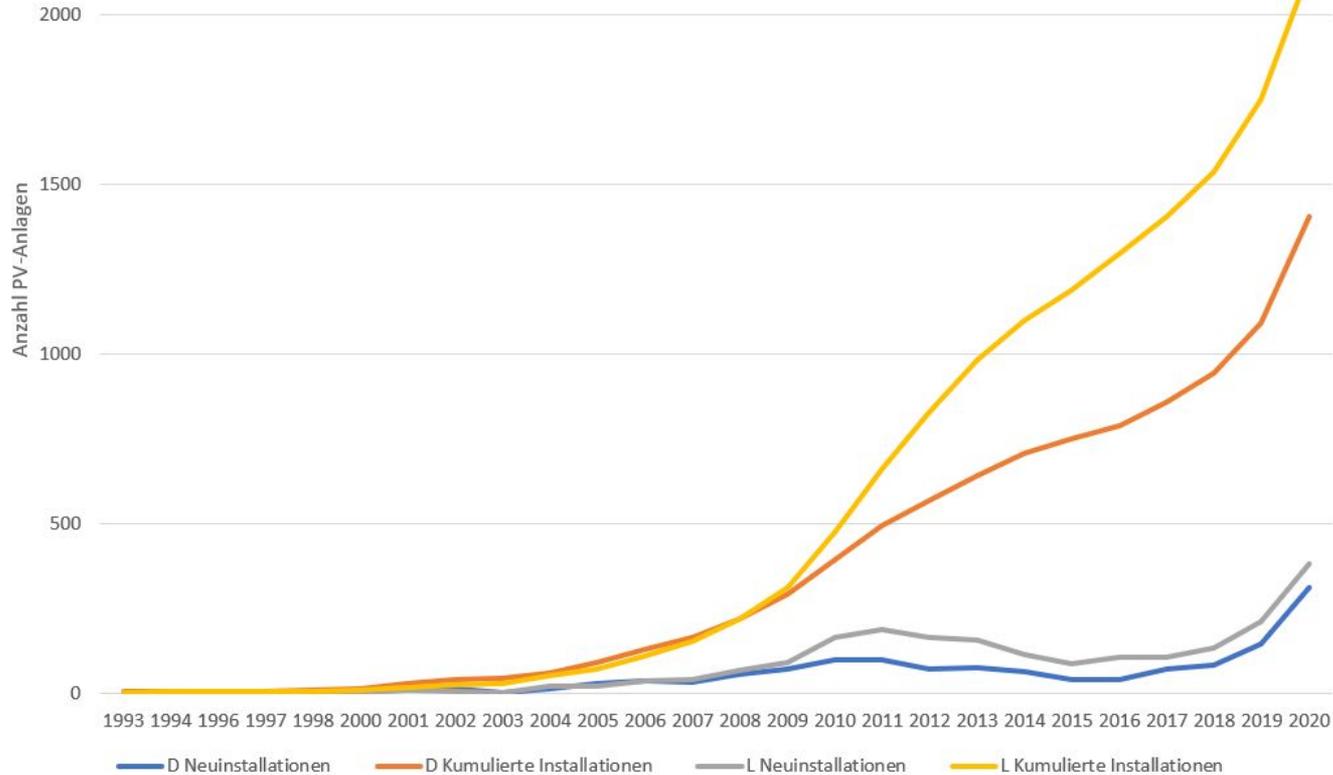
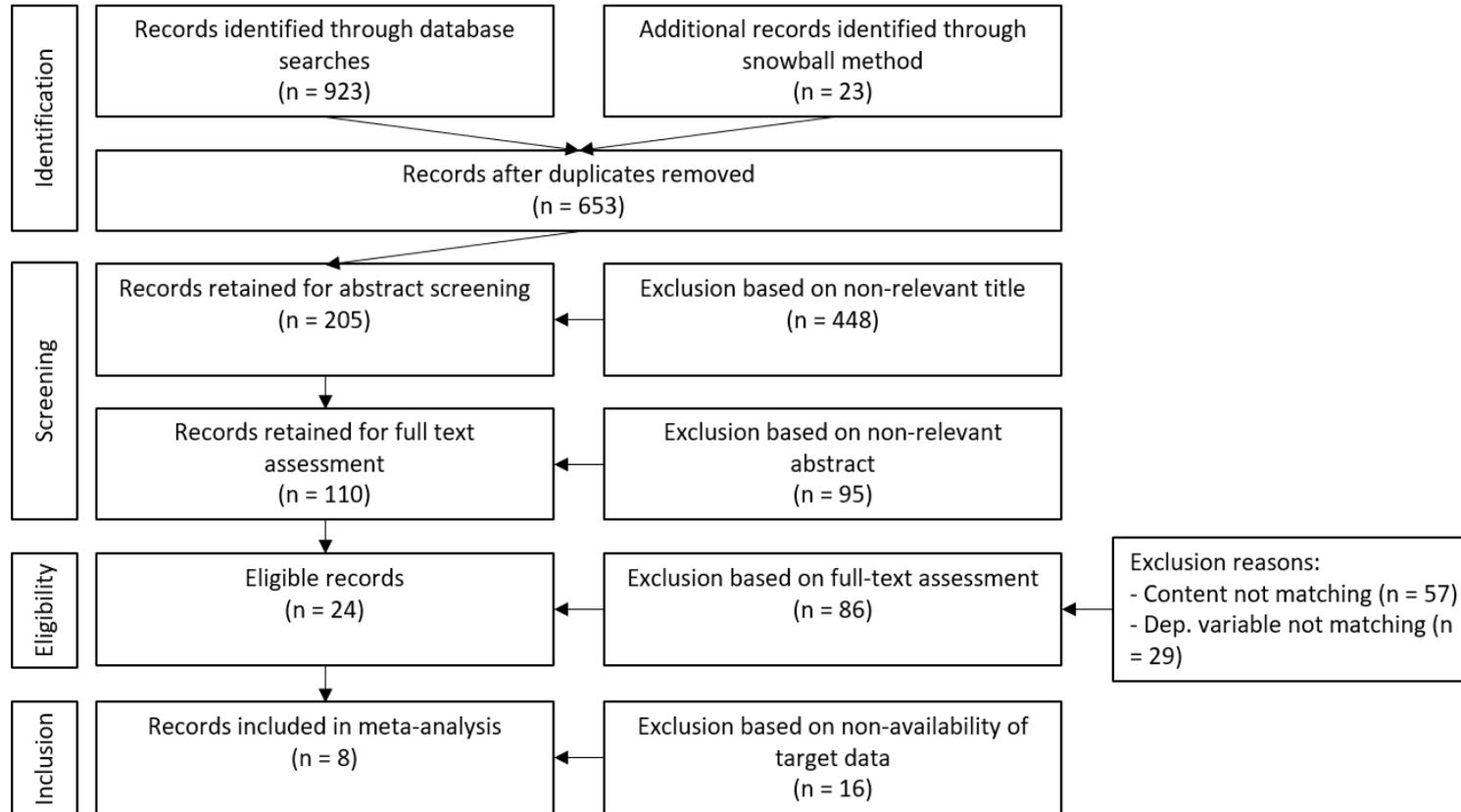


Abb. X: Absoluter Diffusionsverlauf von Aufdach-Photovoltaikanlagen, Einkommen und Gebäudetypologie in den Leipziger Stadtteilen. Quelle: Eigene Darstellung

# FALLSTUDIEN ZUR UNTERSUCHUNG DER PV-DIFFUSION: LEIPZIG UND DRESDEN



# A META-ANALYSE FOR DERIVING COMPONENT WEIGHTHTS



# A META-ANALYSE FOR DERIVING COMPONENT WEIGHTHTS

	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



# PHASE 1: AWARENESS

• **Condition:** None

• **Operation** each time step:

Level of interest  $\geq$  interest threshold?

No  Action module

Yes  Phase 2

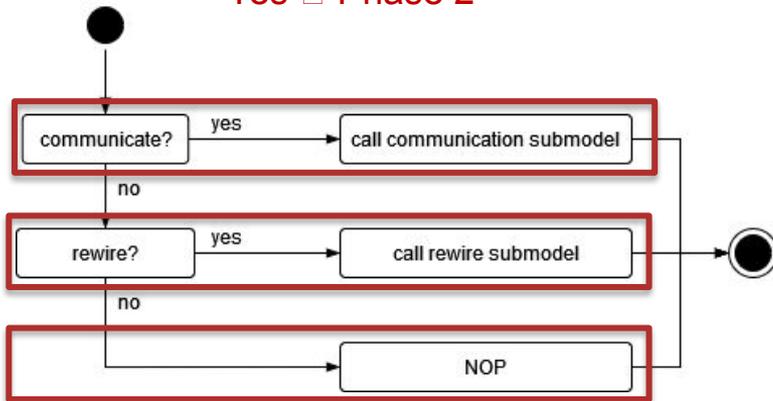


Abb. 1: Action module

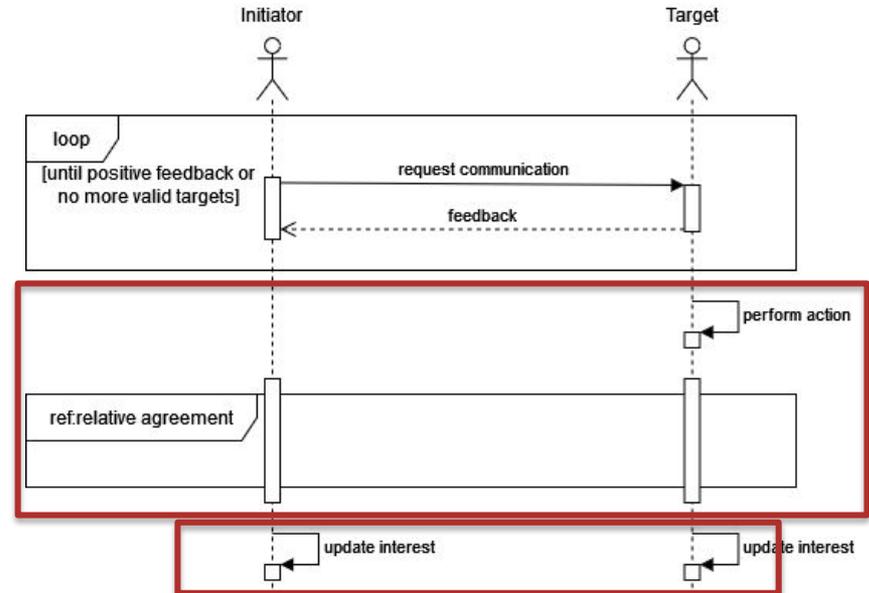


Abb. 2: Communication sub module

## PHASE 3: EVALUATION

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

$$U(i) = \underbrace{w_f}_{\text{Financial}} * U_f(i) + \underbrace{w_{soc}}_{\text{Social}} * U_{soc}(i) + \underbrace{w_l}_{\text{Local}} * U_l(i) + \underbrace{w_{ec}}_{\text{Environment}} * U_{ec}(i) + \underbrace{w_{ns}}_{\text{Innovativeness}} * U_{ns}(i)$$

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)

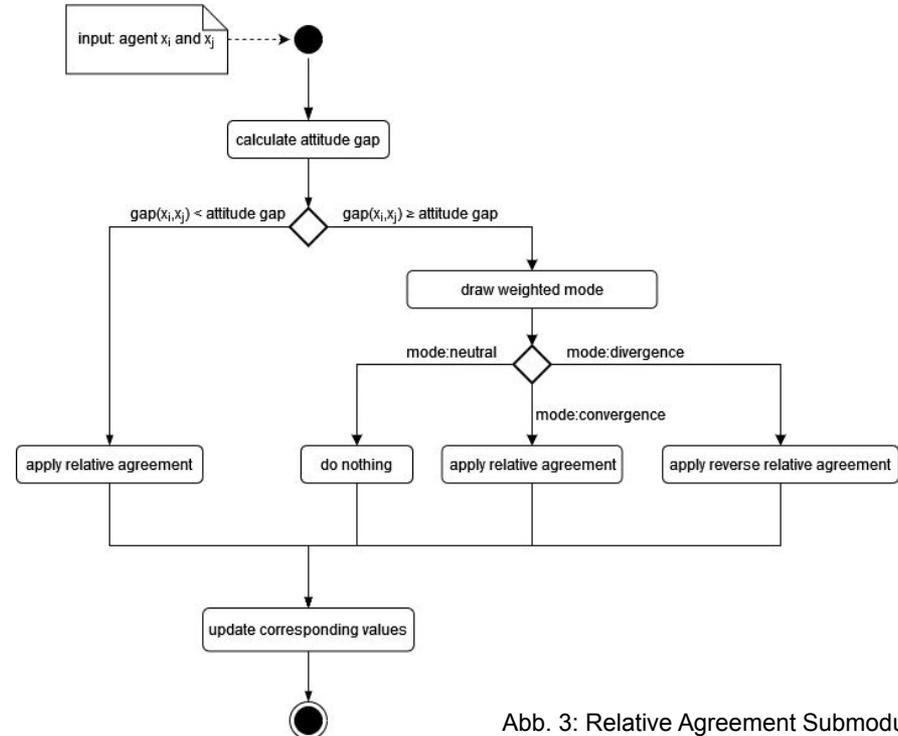


Abb. 3: Relative Agreement Submodul

# 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 → Phase 3 (Evaluation)

Agents without decision authority → 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  $U(i) > \text{Adoption threshold}$
  3. Check if  $Ek(i) > \text{Financial threshold}$
  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<sub>peak</sub> 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<sub>peak</sub>)

$FIT_{t_0}$  = Feed – in tariffs 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  $U_k(i)$

$$U(i) = \underbrace{w}_{\text{Finanziell}} * U_f(i) + \underbrace{w}_{\text{Sozial}} * U_{soc}(i) + \underbrace{w}_{\text{Lokal}} * U_l(i) + \underbrace{w}_{\text{Umweltbew.}} * U_{ec}(i) + \underbrace{w}_{\text{Innovativität}} * U_{ns}(i)$$

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  $1 \text{ kW}_{\text{peak}}$  system

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

$H_{\text{solar}_i}(N_i)$  = Global raditation per  $\text{m}^2$  with angle  $N_i$  ( $\text{kWh}/\text{a}$ )  
 $V(A_i)$  = Factor for orientation,  $1 - (\text{loss for rooftop orientation})$  (%)  
 $\eta_{t_0}$  = Module efficiency at time of calculation (%)  
 $D$  = Degradation/year = 0,5%  
 $PR_{t_0}$  = Performance Ratio,  $1 - (\text{Losses during operation})$  (%)

- Agent-specific roof angle and orientation relevant

# PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

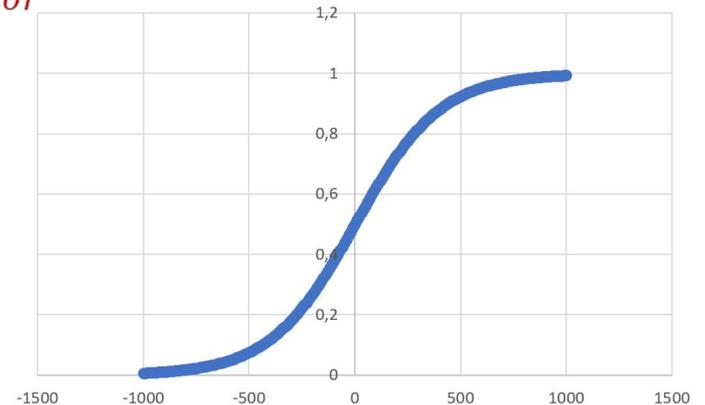
## Financial Utility von Agent i

1. Calculation of agent- and year specific net present value of a 1 kW<sub>peak</sub> 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

$$U_{loc}(i) = \frac{Actualadopters_{social}}{Potentialadopters_{social}}$$

$$- \quad U_{loc}(i) = \frac{Actualadopters_{local}}{Potentialadopters_{local}}$$

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  
 $max_2 = Distance\ filter$

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

## PHASE 3: EVALUATION (CTD.)

### Environmental and innovativeness utility of agent $i$

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

$ec(i)$  = environmental attitude agent  $i$

–

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

$ns(i)$  = 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  $Ek(i) > \text{financial threshold}$

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  $Ek(i) < \text{financial threshold}$

Operation in a timestep: like Phase 1