

# Modellierung der Investitionsdynamik von Aufdach-Photovoltaikanlagen in Deutschland

Martin Klein  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR  
Institut für Technische Thermodynamik, D-Stuttgart  
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung

14. Symposium Energieinnovationen 2016  
10.02.2016, Graz  
Session B1 - Photovoltaik

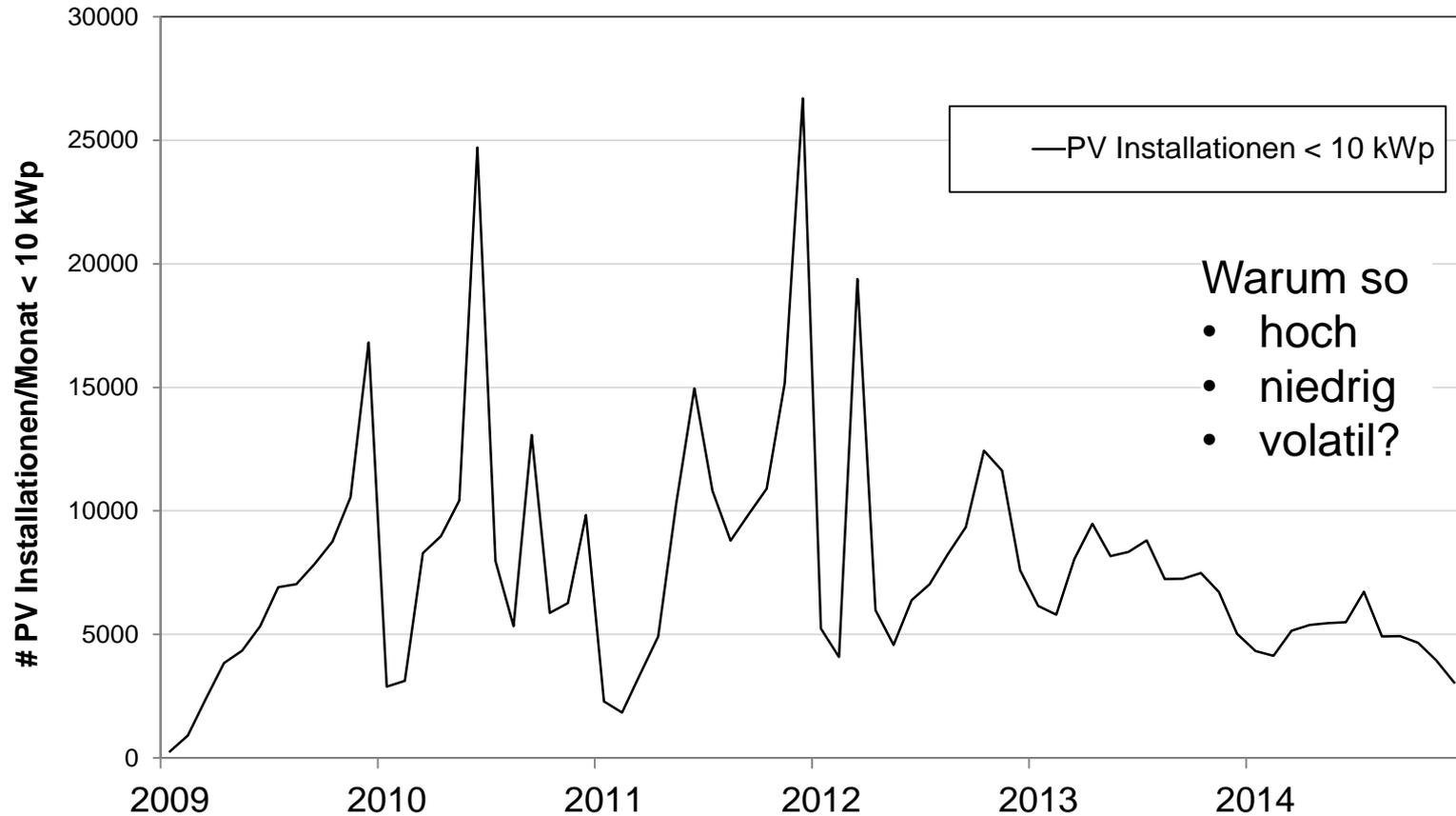


- energy
- > ● scenarios
- school

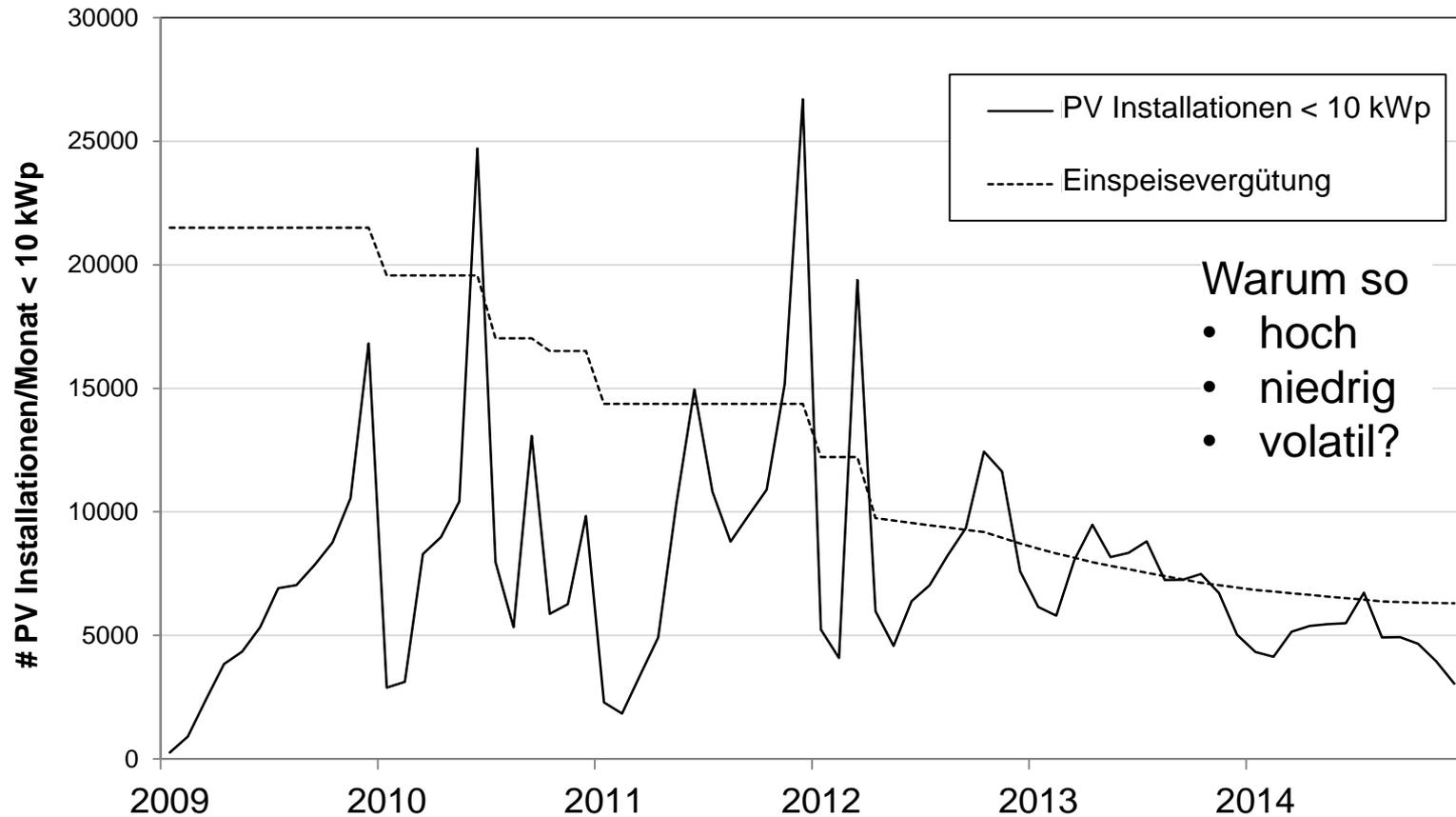
Knowledge for Tomorrow



# Fallstudie: Aufdach-Photovoltaikanlagen in Deutschland



# Fallstudie: Aufdach-Photovoltaikanlagen in Deutschland

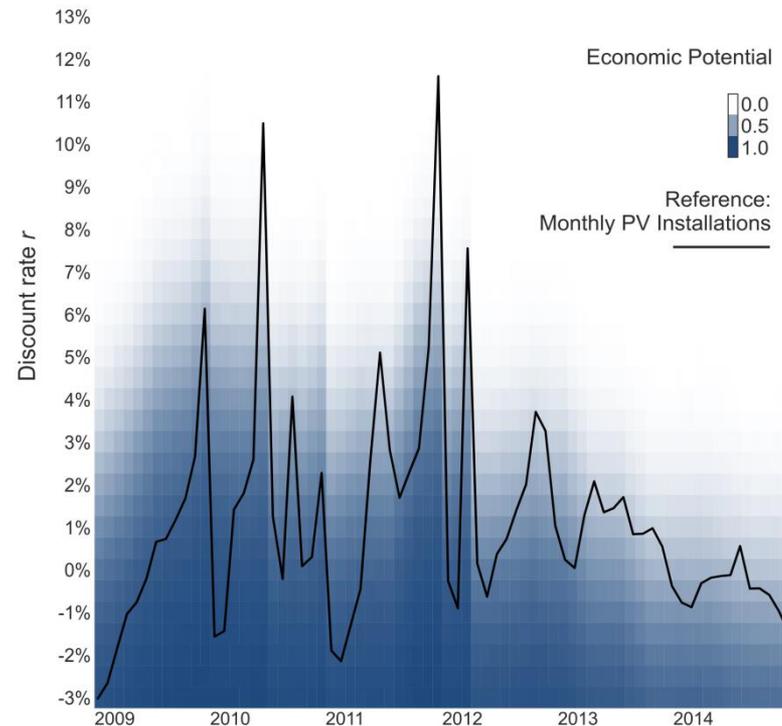


Welcher Mechanismus kann den absoluten Zubau von Photovoltaikanlagen abbilden?

# Ableitung eines ökonomischen Potentials und einer IRR-Verteilung via probabilistischer NPV-Rechnungen

- Resourcenbewertung
- + Anlagenmodellierung
- + NPV Rechnung
- + Monte-Carlo Simulation

→ Ökonomisches Potential  
Ableitung: IRR-Verteilung



# Monte-Carlo-Simulation des ökonomischen Potentials

## Beispiel

$$NPV(r, t) = -I_0(t) + \sum_{n=1}^T \frac{C_{+,i} + C_{-,i}}{(1+r)^n}$$

Run	Investment [€/kW]	Größe [kW]	Einstrahlung [kWh/m <sup>2</sup> ]	PR	Degrad.	O&M [€/kW/a]	Elec. Rate [€/kWh]	Eigenverbrauch	NPV [€]
#1	1565,23	5,81	1292,81	0,76	0,46%	18,15	0,30	0,17	779,70
#2	1608,85	4,40	1260,72	0,78	0,44%	14,38	0,29	0,12	279,86
#3	1617,82	6,19	1182,75	0,75	0,47%	16,63	0,30	0,14	-2803,42
...									
#100000	1642,16	5,04	1132,98	0,82	0,50%	13,95	0,30	0,12	-1741,09

➔  $\Theta(r, t) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \delta_i(r, t), \quad \delta_i(r, t) = \begin{cases} 1, & NPV_i(r, t) > 0 \\ 0, & NPV_i(r, t) \leq 0 \end{cases}$

Siehe auch: Hillier, F.S., 1963. The Derivation of Probabilistic Information for the Evaluation of Risky Investments. *Management Science*, 9(3), pp.443–457.

# Zubauwahrscheinlichkeit

## Geschlossene Form

Zubauwahrscheinlichkeit  $a(t)$

$$a(t) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t), \quad \varepsilon_i(t) = \begin{cases} 1, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) > 0 \\ 0, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) \leq 0 \end{cases}$$

Für unabhängige IRR- und Mindestverzinsungs-Verteilungen:

$$a(t) = \Phi \left( \frac{\mu_h(t) - \mu_{IRR}(t)}{\sqrt{\sigma_h(t)^2 + \sigma_{IRR}(t)^2}} \right)$$



# Zubauwahrscheinlichkeit

## Geschlossene Form

Zubauwahrscheinlichkeit  $a(t)$

$$a(t) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t), \quad \varepsilon_i(t) = \begin{cases} 1, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) > 0 \\ 0, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) \leq 0 \end{cases}$$

Für unabhängige IRR- und Mindestverzinsungs-Verteilungen:

$$a(t) = \Phi \left( \frac{\mu_h(t) - \mu_{IRR}(t)}{\sqrt{\sigma_h(t)^2 + \sigma_{IRR}(t)^2}} \right)$$

Ableitung des ökonomischen Potentials



# Zubauwahrscheinlichkeit

## Geschlossene Form

Zubauwahrscheinlichkeit  $a(t)$

$$a(t) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t), \quad \varepsilon_i(t) = \begin{cases} 1, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) > 0 \\ 0, & r_{IRR,i}(t) - r_{h,i}(t) \leq 0 \end{cases}$$

Für unabhängige IRR- und Mindestverzinsungs-Verteilungen:

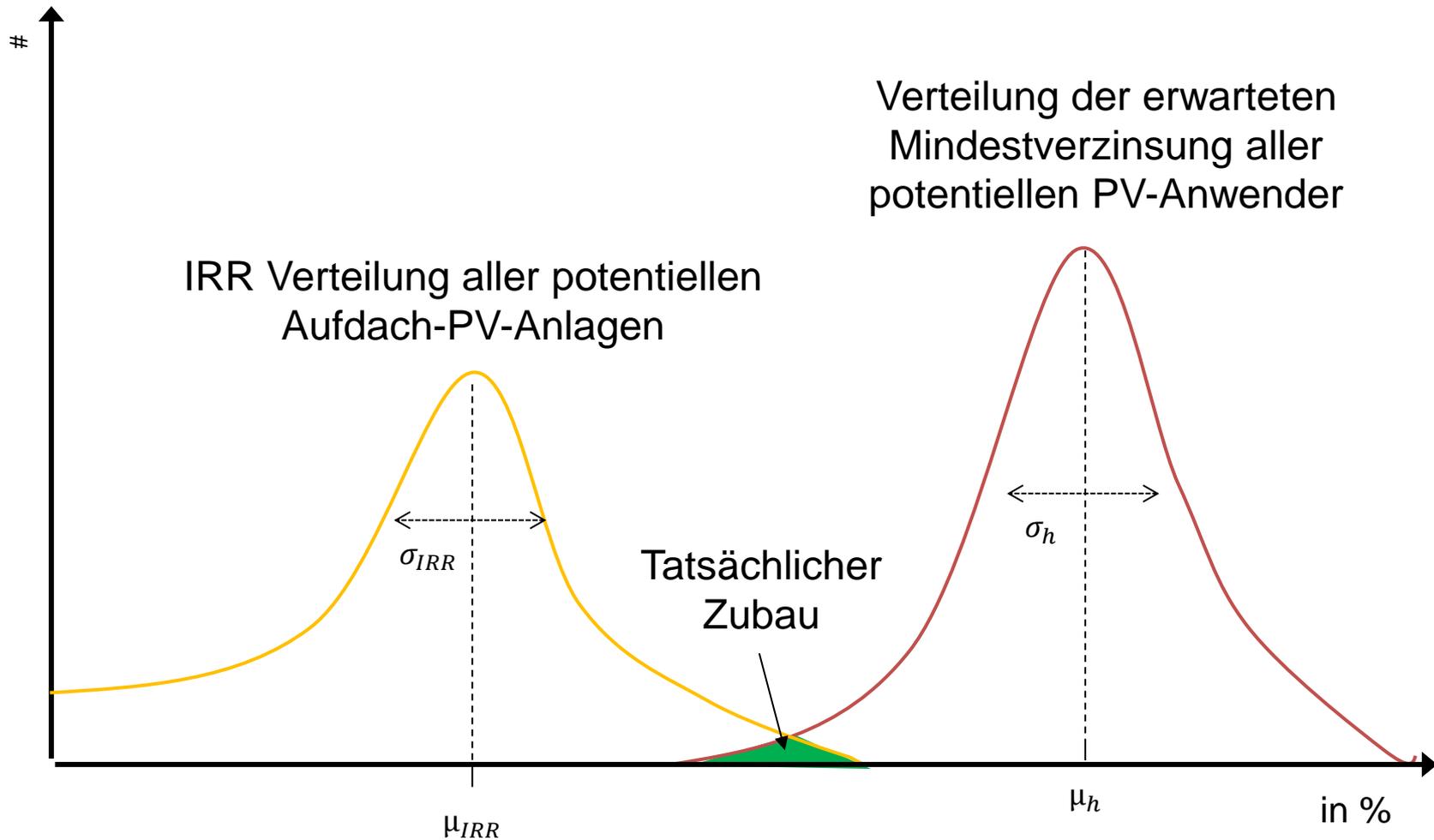
$$a(t) = \Phi \left( \frac{\mu_h(t) - \mu_{IRR}(t)}{\sqrt{\sigma_h(t)^2 + \sigma_{IRR}(t)^2}} \right)$$

Unbekannt (Parameter-Schätzungen, folgt)

Ableitung des ökonomischen Potentials

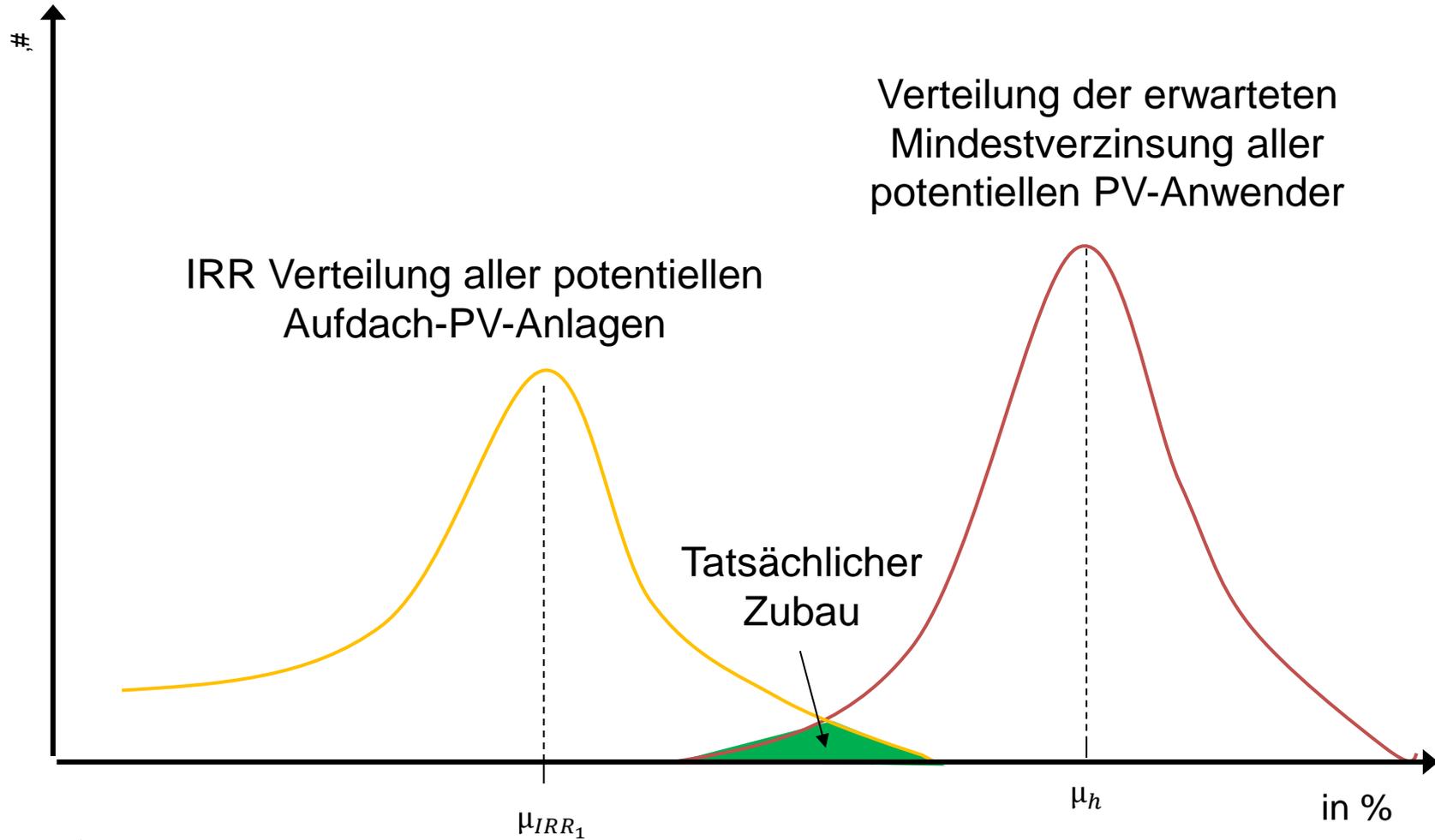


# Der Mechanismus

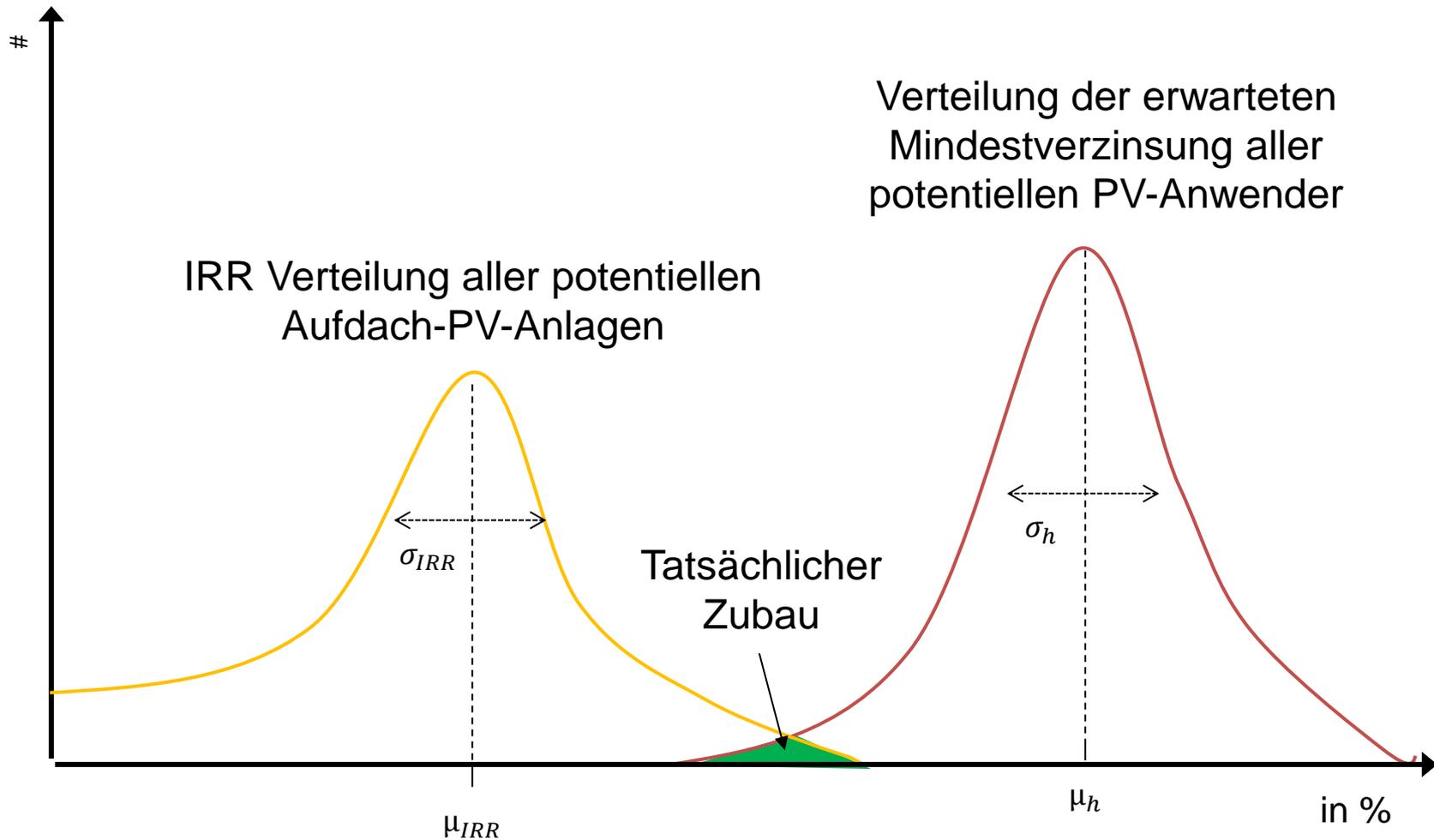


# Der Mechanismus – Dynamik

## Änderung der IRR-Verteilung

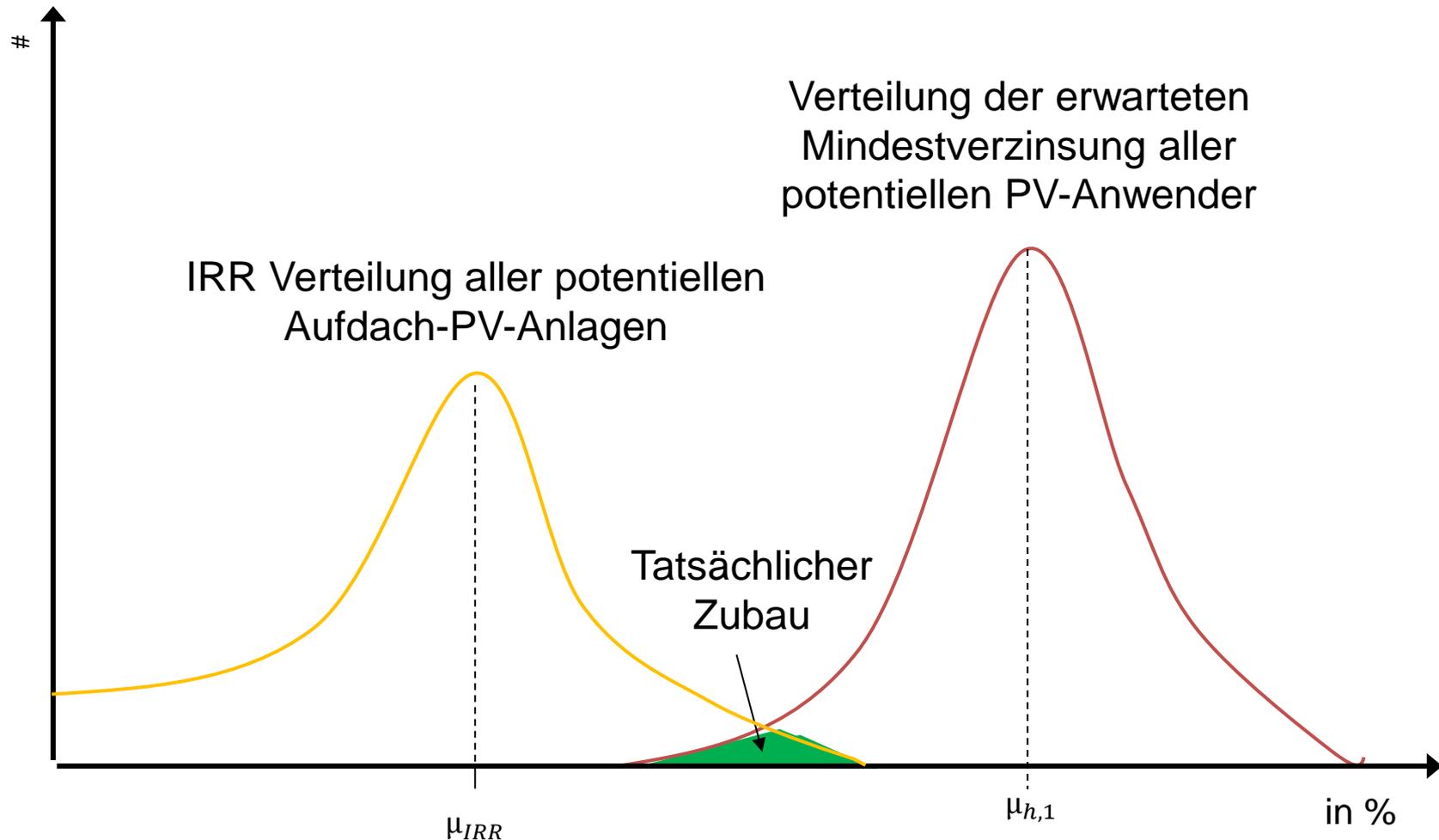


# Der Mechanismus

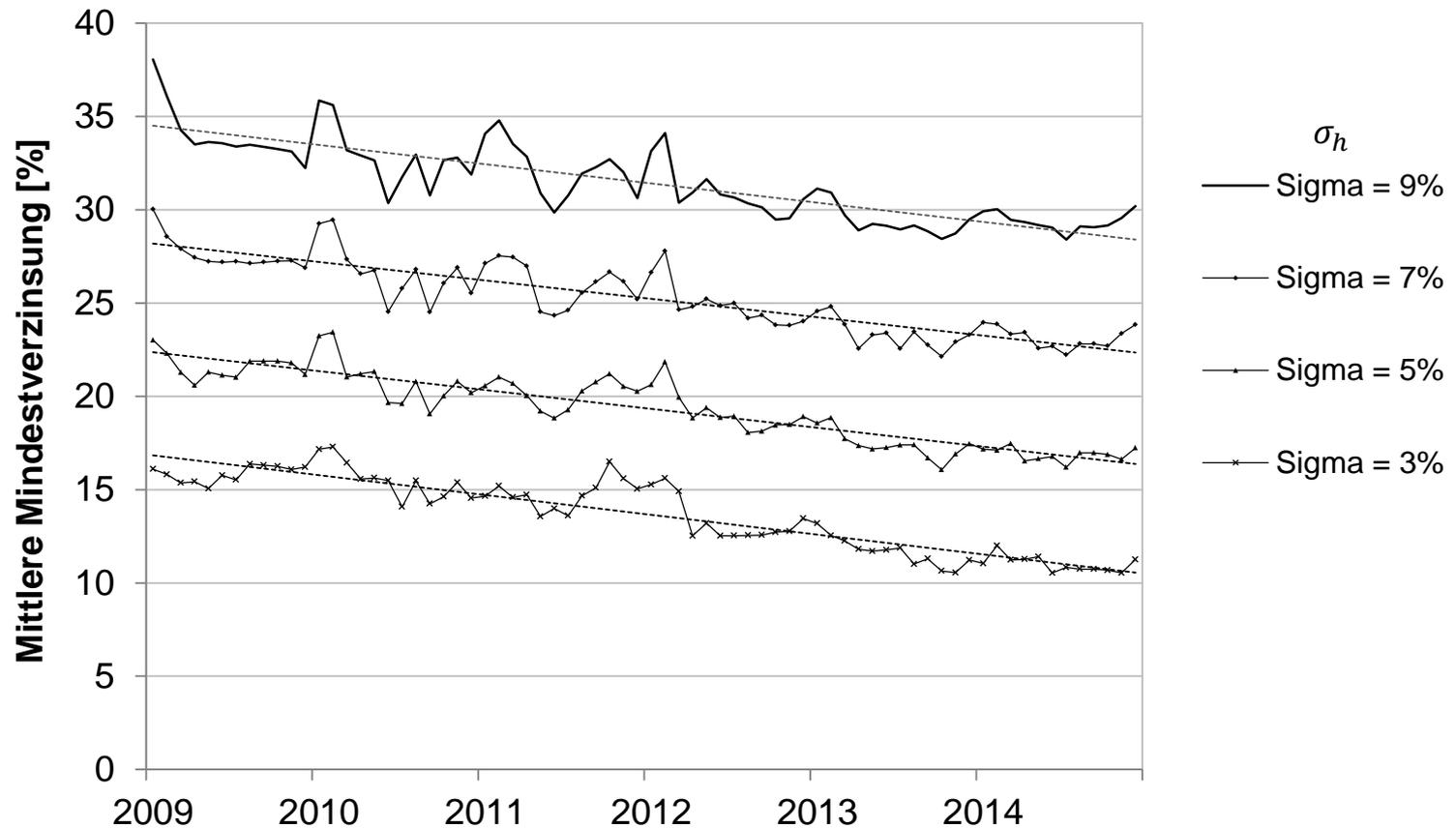


# Der Mechanismus – Dynamik

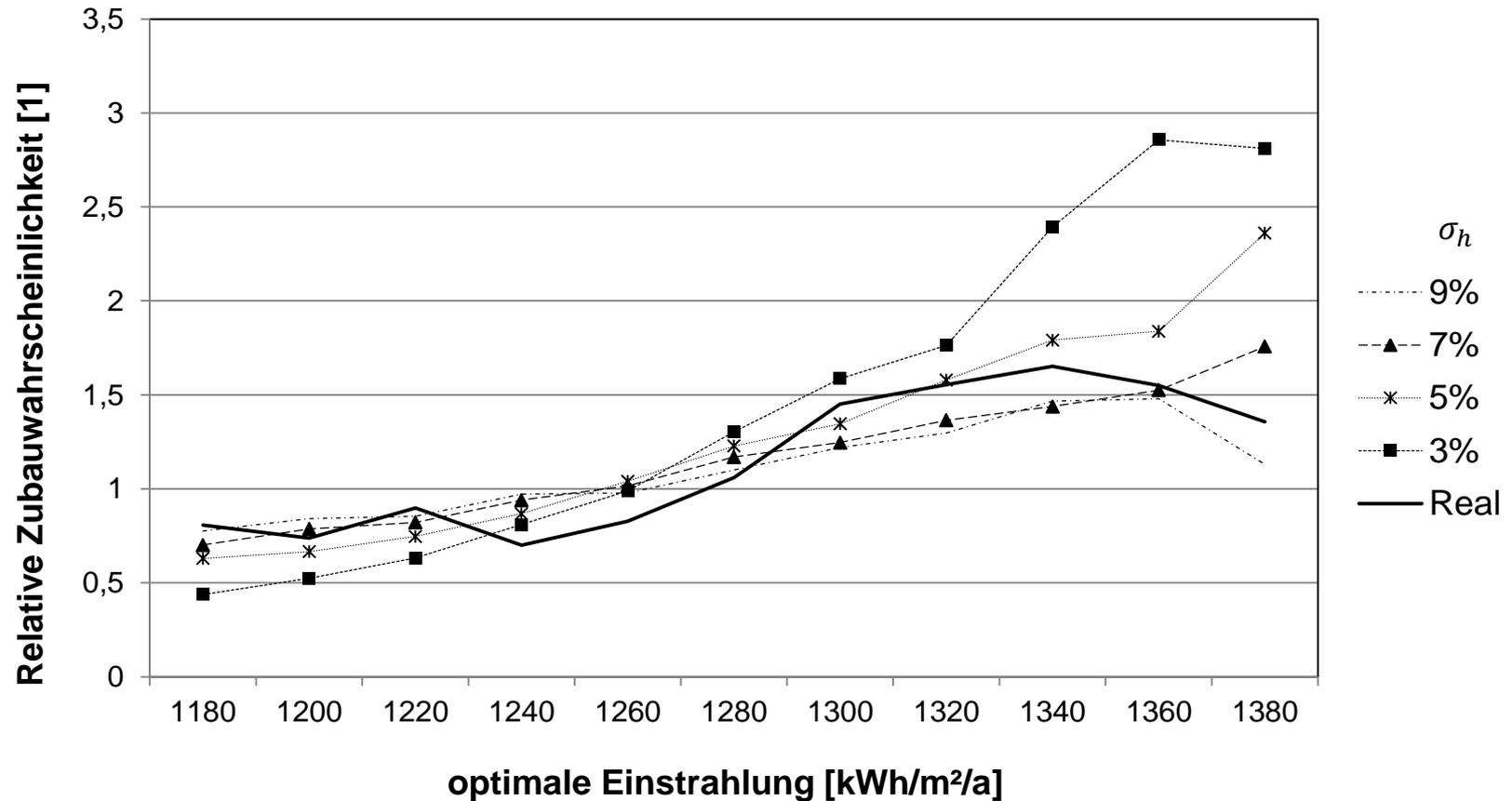
## Änderung der Mindestverzinsungs-Verteilung



# Ergebnisse – Mittlere Mindestverzinsung in der zeitlichen Entwicklung



# Ergebnisse – Ortsabhängige Betrachtungen erlauben Eingrenzung der Verteilung



# Zusammenfassung

- Fundamentaler Mechanismus, um die absolute Anzahl an PV-Installationen abzubilden
- Reduktion auf eine Formel für die Zubauwahrscheinlichkeit möglich
- Hinweis, dass die mittlere Mindestverzinsung über die Zeit abgenommen hat
- Mechanismus übertragbar auf andere dezentrale Energietechnologien



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Martin Klein

m.klein@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR  
Institut für Technische Thermodynamik, D-Stuttgart  
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung

14. Symposium Energieinnovationen 2016

10.02.2016, Graz

Session B1 - Photovoltaik



Knowledge for Tomorrow



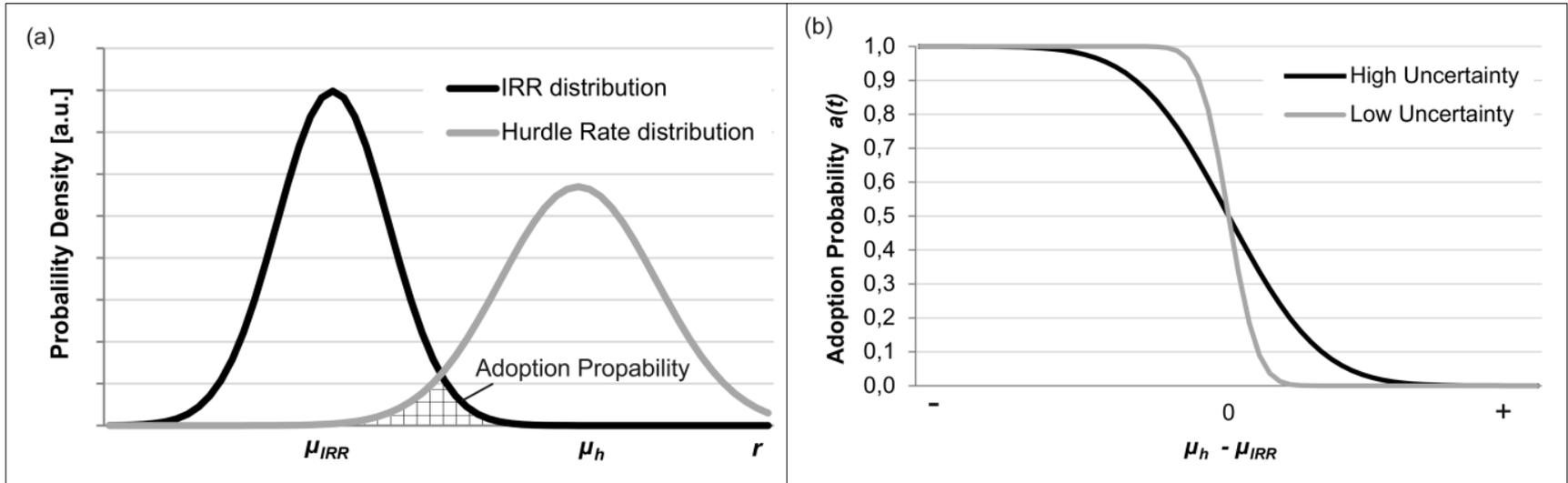
- energy
- > ● scenarios
- school

# Literatur

1. J.H. Williams, A. DeBenedictis, R. Ghanadan, A. Mahone, J. Moore, W.R. Morrow, S. Price, M.S. Torn, *Science* **2011**, 335, 53.
2. H. Müller-Steinhagen, J. Nitsch, *Process Safety and Environmental Protection* **2005**, 83, 285.
3. T.S. Schmidt, *Nature Climate Change* **2014**, 4, 237.
4. C. Candelise, M. Winskel, R.J.K. Gross, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, 26, 96.
5. R. Haas, G. Lettner, H. Auer, N. Duic, *Energy* **2013**, 57, 38.
6. R. Schleicher-Tappeser, *Energy Policy* **2012**, 48, 64.
7. J. Seel, G.L. Barbose, R.H. Wiser, *Energy Policy* **2014**, 69, 216.
8. T. Grau, *Energy Economics* **2014**, 44, 36.
9. A. van Benthem, K. Gillingham, J. Sweeney, *The Energy Journal* **2008**, 29, 131.
10. R. Wand, F. Leuthold, *Applied Energy* **2011**, 88, 4387.
11. R. Lobel, G. Perakis, *SSRN Electronic Journal* **2011**.
12. J. Palmer, G. Sorda, R. Madlener, *Technological Forecasting and Social Change* **2015**, 99, 106.
13. V. Rai, S.A. Robinson, *Environmental Research Letters* **2013**, 8, 014044.
14. R.A. Brealey, S.C. Myers, *Principles of Corporate Finance*, McGraw-Hill **2000**.
15. S.B. Darling, F. You, T. Veselka, A. Velosa, *Energy & Environmental Science* **2011**, 4, 3133.
16. N.H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W.G.J.H.M. van Sark, K. Kiefer, C. Reise, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **2012**, 20, 717.
17. R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, J. Palm, *Applied Energy* **2015**, 142, 80.
18. J. Weniger, T. Tjaden, V. Quaschnig, *Energy Procedia* **2014**, 46, 78.
19. D.C. Jordan, S.R. Kurtz, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **2011**, 21, 12.
20. K. Mainzer, K. Fath, R. McKenna, J. Stengel, W. Fichtner, F. Schultmann, *Solar Energy* **2014**, 105, 715.
21. T. Huld, R. Müller, A. Gambardella, *Solar Energy* **2012**, 86, 1803.
22. J. Hoppmann, J. Volland, T.S. Schmidt, V.H. Hoffmann, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, 39, 1101.
23. F.S. Hillier, *Management Science* **1963**, 9, 443.
24. P. Geroski, *Research Policy* **2000**, 29, 603.
25. K.E. Train, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press **2009**.



# Replicating the sigmoid shape of discrete choice models



# Derivation – IRR-distribution

$$\Theta(r, t) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \delta_i(r, t), \quad \delta_i(r, t) = \begin{cases} 1, & NPV_i(r, t) > 0 \\ 0, & NPV_i(r, t) \leq 0 \end{cases}$$

$$IRR := \{r \mid NPV(r) = 0\}$$

 IRR-Distribution:

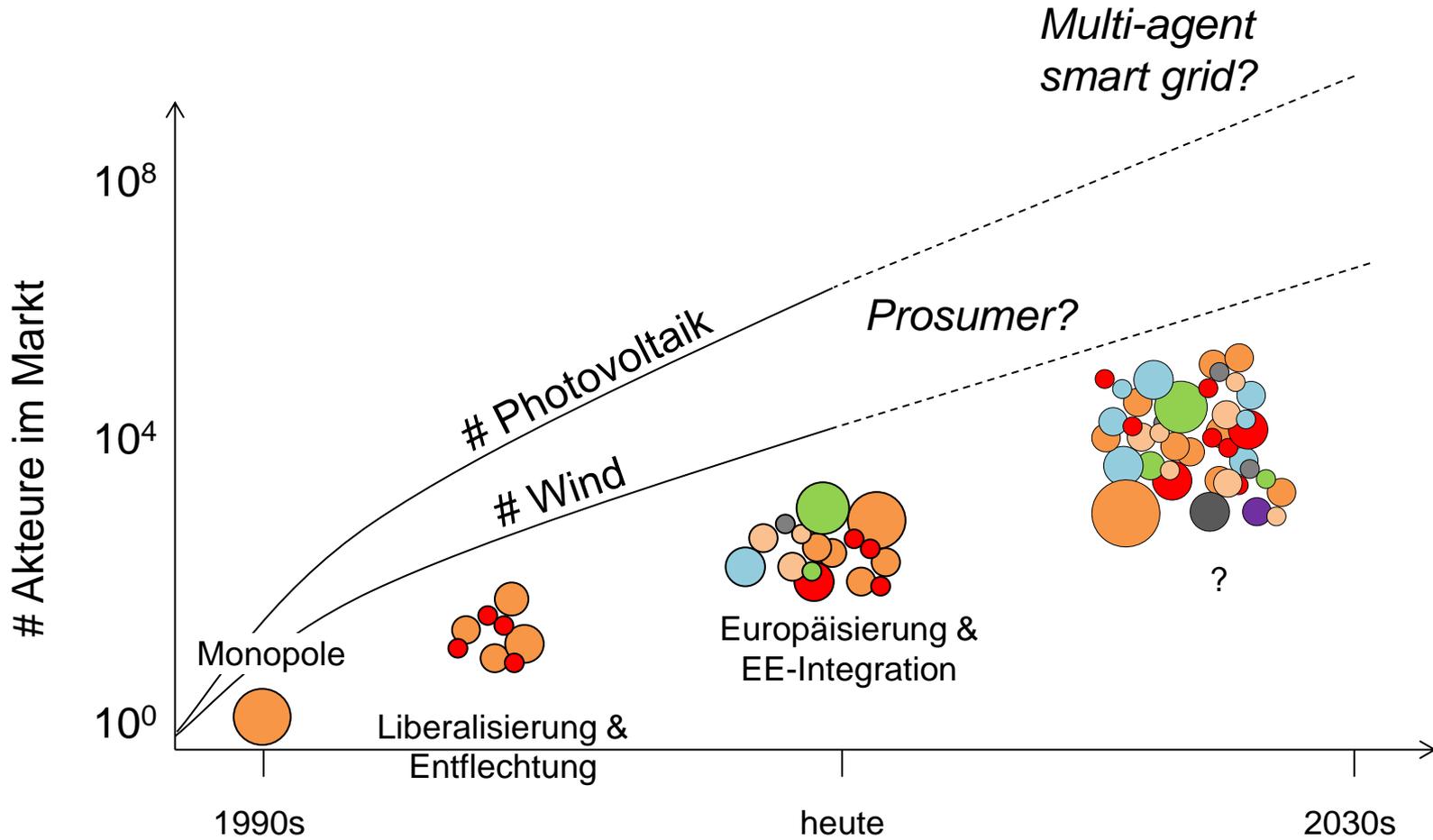
$$\vartheta(r, t) = - \frac{\partial \Theta(r, t)}{\partial r}$$

Also refer to: Hillier, F.S., 1963. The Derivation of Probabilistic Information for the Evaluation of Risky Investments. *Management Science*, 9(3), pp.443–457. Available at: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.9.3.443>



# Energiemärkte als Komplexe Adaptive Systeme

## Agent Based Computational Economics (ACE)



# Agent Based Modeling of electricity markets

## The AMIRIS model

