



# Ökonomische Analyse nachhaltiger Raumallokation von Energiewirtschaften

Theoretische Untersuchung und agentenbasierte Modellierung  
erneuerbarer Energiesysteme

Thomas Lauf (OEKON)

Betreuer: Erik Gawel (OEKON), Karin Frank (OESA)

Leipzig, 02.06.2014

Kontakt: [Thomas.Lauf@ufz.de](mailto:Thomas.Lauf@ufz.de)

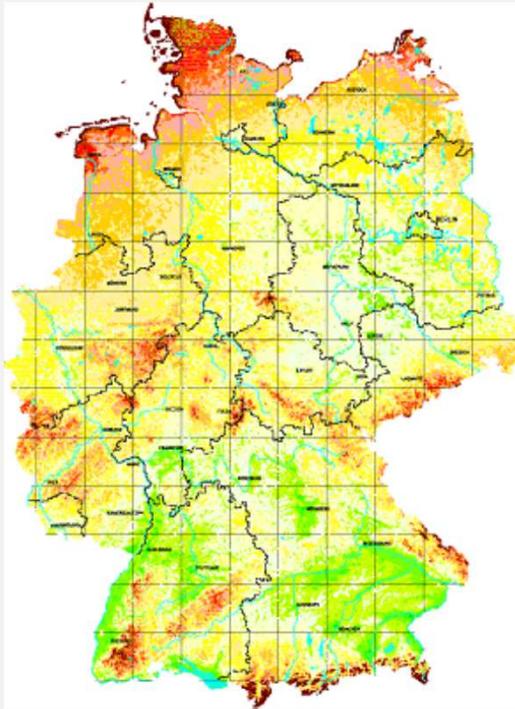


HELMHOLTZ  
ZENTRUM FÜR  
UMWELTFORSCHUNG  
UFZ

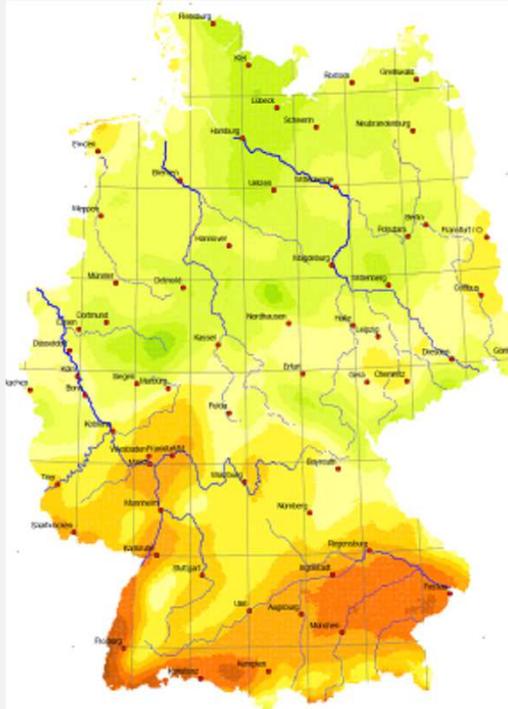
# 1. Der Hintergrund

# Bwl. Komponenten der Raumallokation

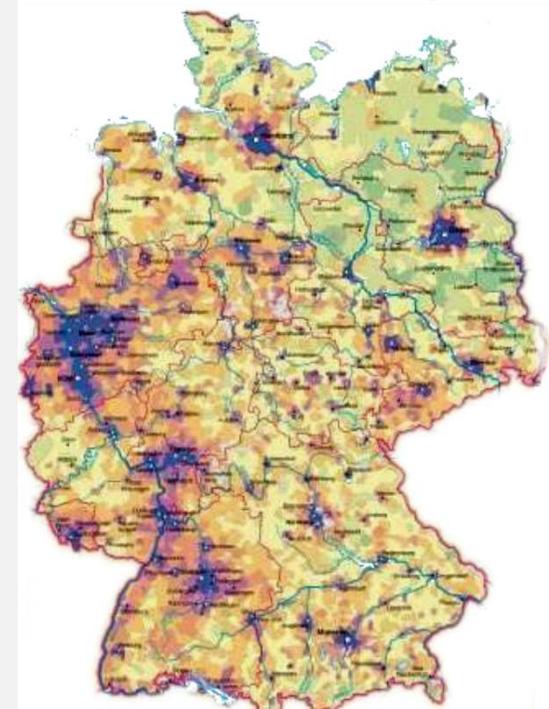
Windhöufigkeit



Solare Einstrahlung



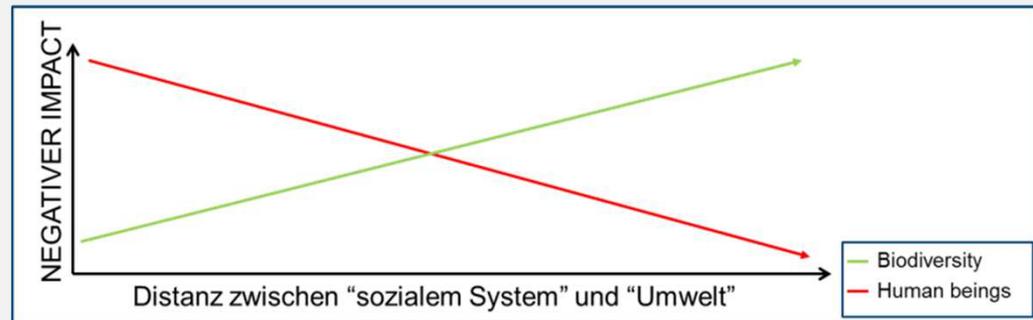
Bevölkerungsdichte



- Natürliche Standortfaktoren als Kriterium für das Ertragspotential (Wind, Sonne)
- Vorhandene Infrastrukturverteilung (Lastzentren, bestehende Stromleitungen)

# Nebenwirkungen der Raumallokation

- **NIMBY-(Not in my backyard)-Problem**
  - Negative, lokale, externe Effekte durch Platzierung einer neuen Infrastrukturanlage mit gesamtwirtschaftlichem positiven Nettonutzen (van der Horst 2007, Wolsink 2007, Groothuis et al. 2008)
    - Emissionen
    - Landschaftsästhetik
- **Ökologische Auswirkungen der EE**
  - Erhöhte Mortalität durch Windkraftanlagen bei Vogelpopulationen (Hötker et al. 2004)



# Verteilungsaspekte der Raumallokation

- **Regionalökonomische Pull-Faktoren**

(George et al. 2009, Hirschl et al. 2010, Kosfeld 2011)

- Gewerbesteuern an Kommunen und Land,
- Nettoeinkommen der Beschäftigten aus der EE-Branche,
- Gewinne nach Steuern der Unternehmen der EE-Branchen
- Beispiele: Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt



- **Regionalökonomische Push-Faktoren**

(van der Horst 2007, Wolsink 2007, Groothuis et al. 2008, Hötcker et al. 2004)

- Übermäßige Belastung durch negative, externe Effekte
- Beispiele: Bayern, Baden-Württemberg



- **Steuerung der Ansiedlungsdynamiken** durch länderspezifische Ausbauziele und landesplanerische Vorgaben für die Flächenbereitstellung



→ **Multi-laterale Tradeoff-Problematik**

# Bisherige räumliche Modellansätze

## Multi-criteria site assessment models

FlächEN, Drechsler et. al (2011)  
Langendörfer et. al (2012)  
etc.

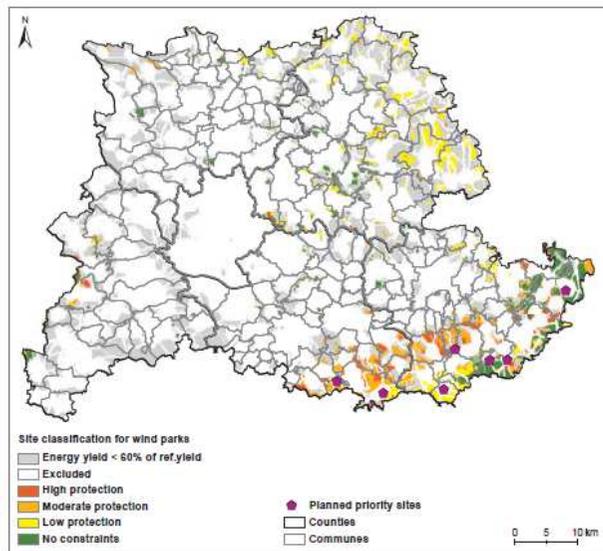


Fig.: Sliz-Szkliniarz (2011)

## Integrated assessment models

Markal, TIMES, PRIMES  
Agarwal (2013)  
etc.

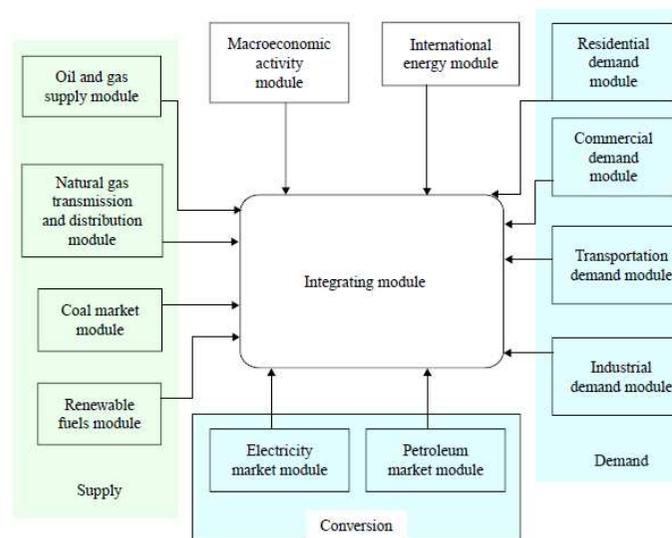


Fig.: EIA (2010)

## Computable General Equilibrium (CGE) models

Only Energy model, Cruz & Taylor (2013)  
etc.



Fig.: Cruz & Taylor (2013)

## 2. Die Forschungsfragen und Methodik

# Forschungsfragen

## **Wie sieht eine vwl. kostenminimale Raumallokation von Strominfrastruktur bei unterschiedlichen Entscheidungsverfahren (Markt, Regulierung) aus?**

- Bewertung über Kostenfunktion (diverse Kostenarten, auch des Raumwiderstandes) u.d.N. der Stromversorgung einer stilisierten Landschaft
- Berücksichtigung vielfältiger Kosten-Trade-offs

## **Welche Instrumente können Nachhaltigkeit, bezogen auf Energielandschaften, am besten sicherstellen (raumspezifizierte Treiberinstrumente, Landnutzungsinstrumente)?**

- Governance-Architektur

## **Welche Rolle spielen regionale Verteilungsfragen bei der Kostenminimierung?**

- Welche Region/Standort muss welche Netto-Kosten zur Gesamtversorgung im System übernehmen?

# Methodik

- **Anwendung eines ABM-Ansatzes**

- Bottom-up-Ansatz aus dem Forschungsbereich der künstlichen Intelligenz
- *«In agent-based models, individual agents (organisms, human actors, organisations) are described as unique and autonomous entities, which have a goal (survival, fitness, profit) and base their behavior on adaptive decisions.»*

- **Vorteile des Modellansatzes**

- Abbildung heterogener Energiepotentiale (Windhöufigkeiten, solare Einstrahlung) und Raumsensibilitäten (schützenswerte Ökosysteme, exponierte Lagen)
- Betrachtung von Interaktionen innerhalb und zwischen verschiedenen Akterusgruppen (Beziehung zwischen Konsument, Produzent und staatlichem Akteur) und Infrastrukturen (Installierte Leitungen)

# 3. Der Modellansatz

# Das Grundmodell

Nutzenfunktion:

$$W = PS + CS - X$$

Produzentenrente:

$$PS = \sum_{n=1}^N \pi_n$$

Konsumentenrente :

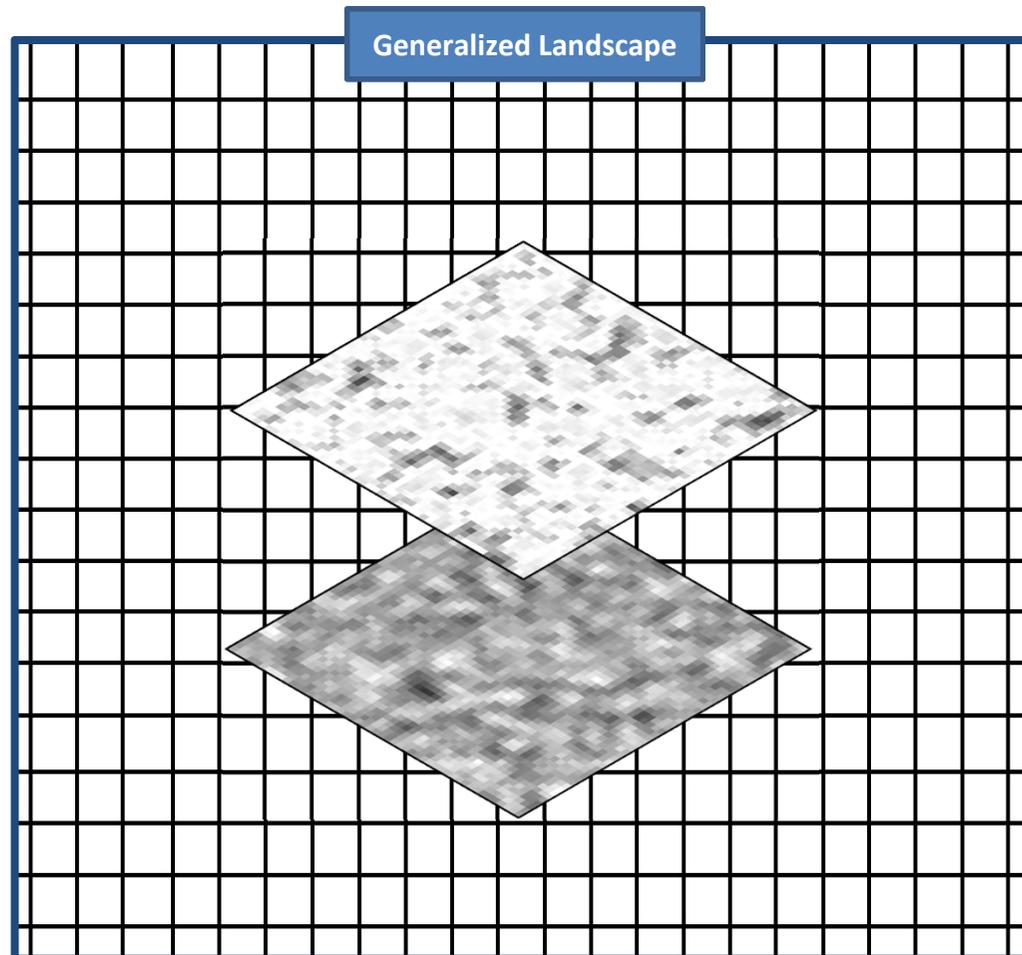
$$CS = \sum_{j=1}^J Y_j^D \left( \frac{\rho_{max} - \bar{\rho}}{2} - \frac{C_{GE}}{\sum_{j=1}^J Y_j^D} \right) + mY_j^S$$

Raumleid  
(externe Raumkosten):

$$X = X_P + X_G$$

Business Consideration		
Variable	Criteria	Agent Affected
$C_P$	Business Production Costs	Producer
$C_{GC}$	Business Connection Grid Costs	Producer
$C_{GE}$	Business Costs for the Existing Grid System	Consumer Center
$X_P$	External Spatial Costs from Production	Consumer Center
$X_G$	External Spatial Costs from Transportation	Consumer Center
Macroeconomic Consideration		

# Modellelemente



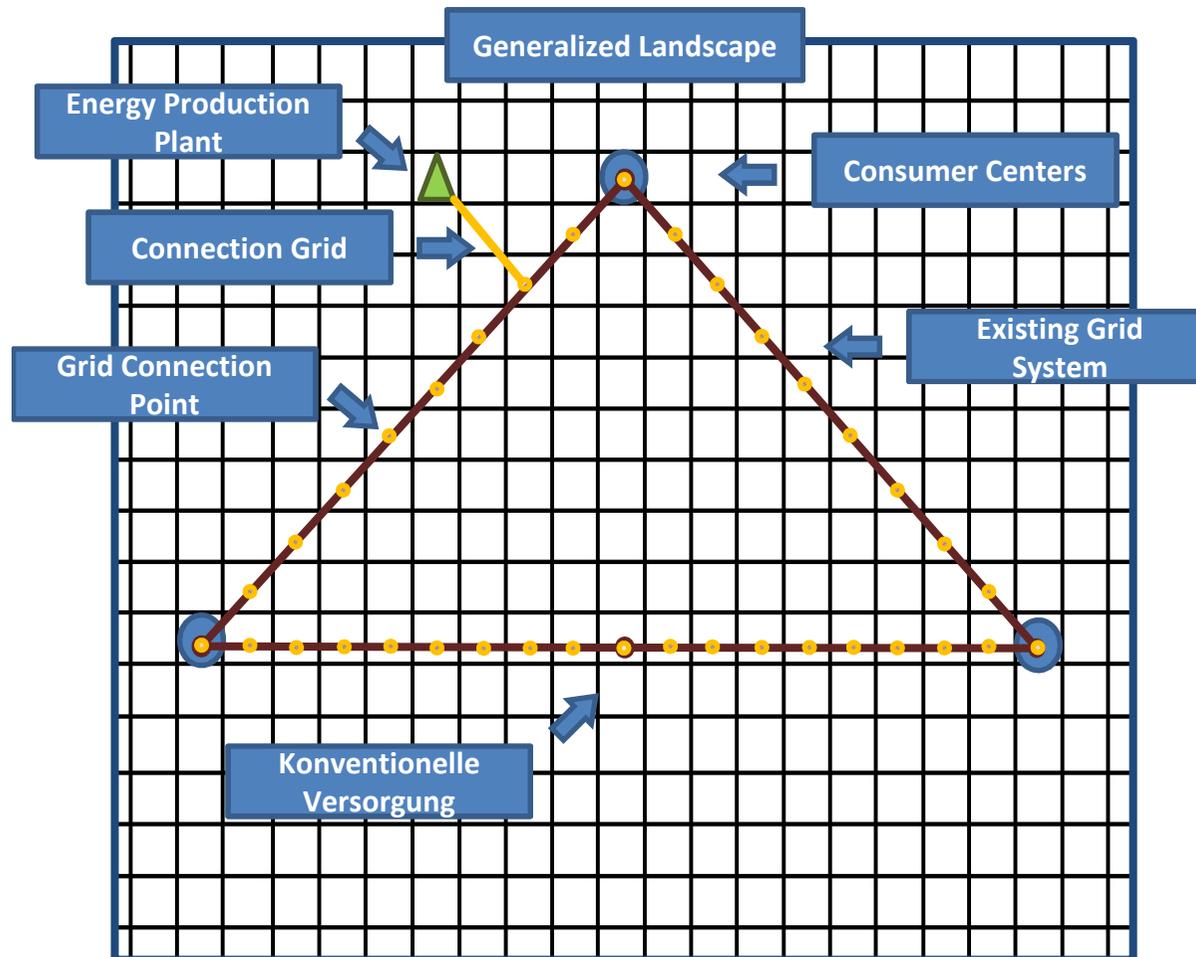
Cells:

$$\{i = 1, \dots, I\}$$

**Energy revenue  
potential ( $h$ )**

**Site-related  
external costs ( $x_S$ )**

# Modellelemente



**Cells:**  
 $\{i = 1, \dots, I\}$

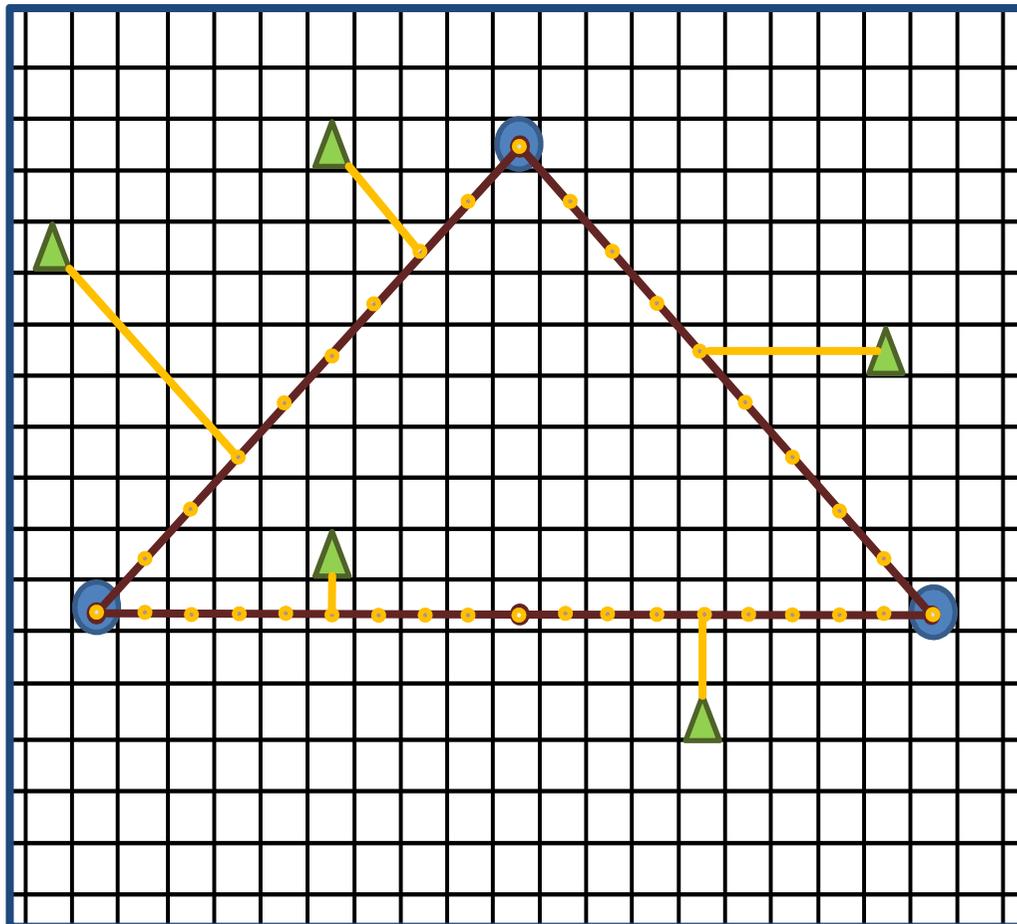
**Consumer Centers:**  
 $\{j = 1, \dots, J\}$

**Existing Grid System  
with Edges:**  
 $\{e = 1, \dots, E\}$

**and Vertices:**  
 $\{v = 1, \dots, V\}$

**Producer:**  
 $\{n = 1, \dots, N\}$

# Modellablauf und Profitfunktion des Produzenten



Modelldurchlauf endet wenn:

$$Y^S \geq Y^D$$

Profitfunktion der Produzenten:

$$\max_{y^S, c_n} \pi(y^S, c_n) = \bar{\rho} y^S - c_n$$

Produktionsbedingte Kosten Prod.:

$$c_n(c_P, c_{GC}) = c_P + c_{GC}(d_{iv})$$

Produktionskosten:  $c_P = w_{PC} l_{PC}$

Anschlussnetz.:  $c_{GC}(d_{iv}) = w_{GC} \min d_{iv}$

Energetischer Output:  $y^S(h) = h l_{PC}$

# Die Auswertung

- **Untersuchung von verschiedenen Instrumenten-Szenarien**
- **Anwendung der Sensitivitätsanalyse als Auswertungsmechanismus**
  - Verstehen von kausalen Zusammenhängen
  - Identifizierung von relevanten Treibern
- **Evaluierung anhand von drei Auswertungsfunktionen**

**Effizienzmaß (Tiefenmaß)**

$$CV = W^*(\pi_n^*) - W^a(\pi_n^a)$$

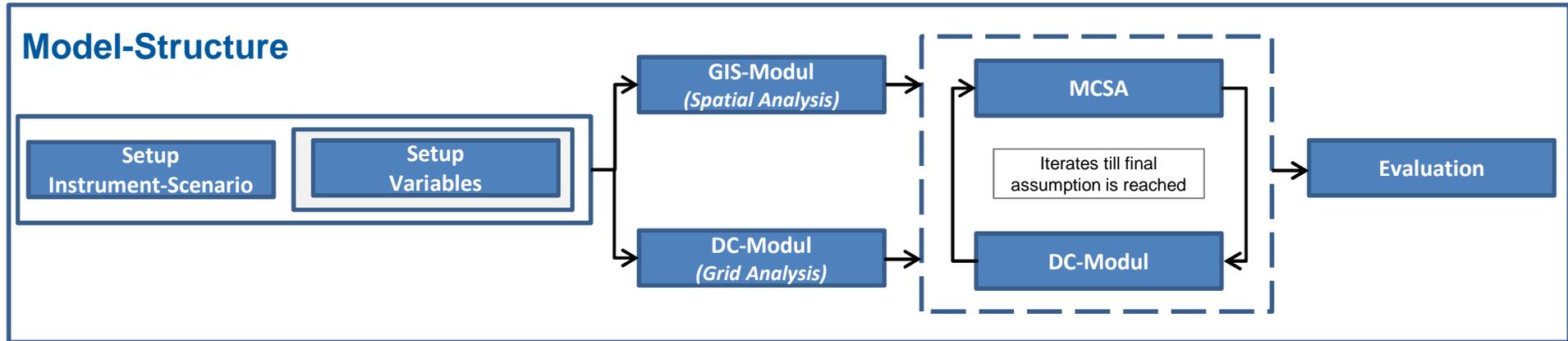
**Aggregiertes Raumleid:**

$$X = X_P + X_G$$

**Fairnessmaß (Vergleich der regionalen CR unter Einbezug des regionalen Raumleids):**

$$CS^{MC}_J = CS_j - X_j(X_{Gj}, X_{Pj})$$

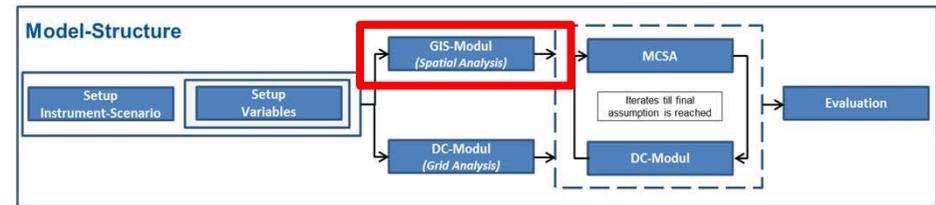
# Die Modellstruktur



- **Modulartige Struktur**
- **Verwendung der Modellplattformen R & NetLogo**
- **Integration von räumlicher Modellierung und eines abstrahierten Lastflussmodell-Ansatzes**

# Das GIS-Modul

## Berechnung der externen Kosten

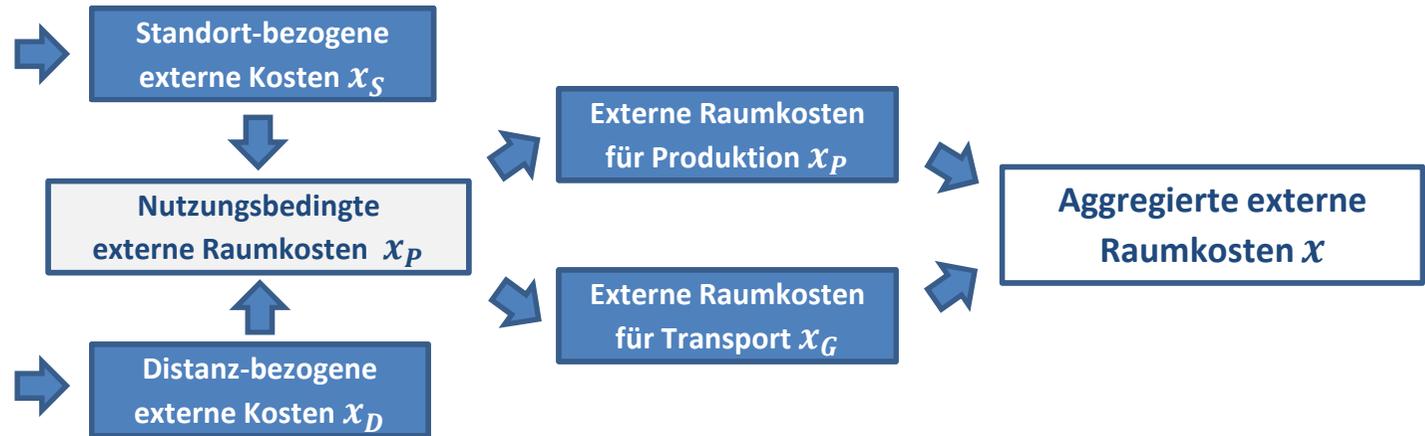


### Soziale externe Kosten (NIMBY)

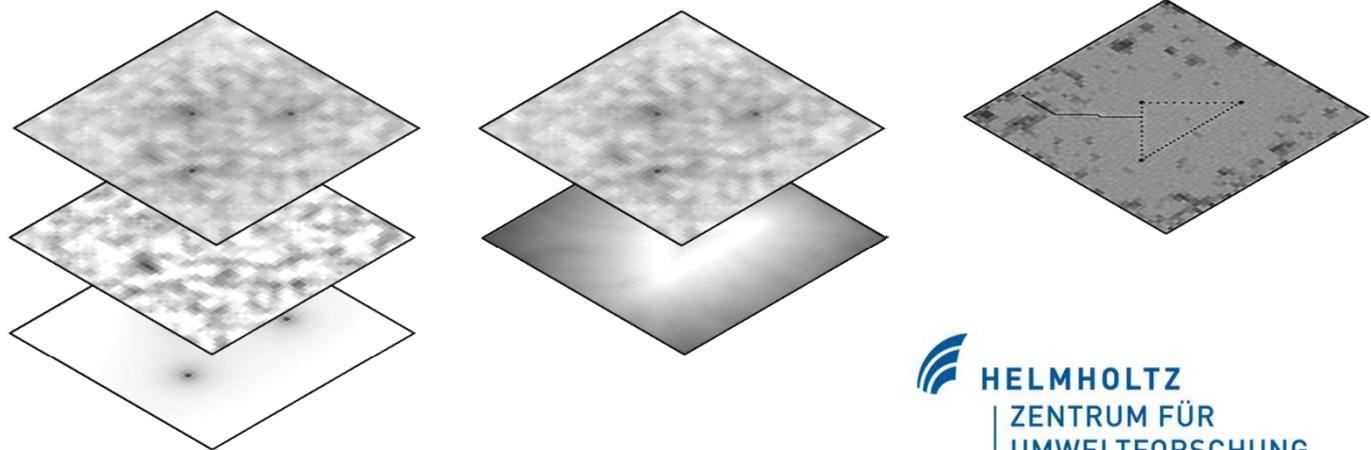
- Verschattung
- Verspiegelung
- Zerschneidung
- Gesundheitl. Auswirkungen

### Ökologische externe Kosten

- Erhöhte Vogelmortalität
- Bodendegradation

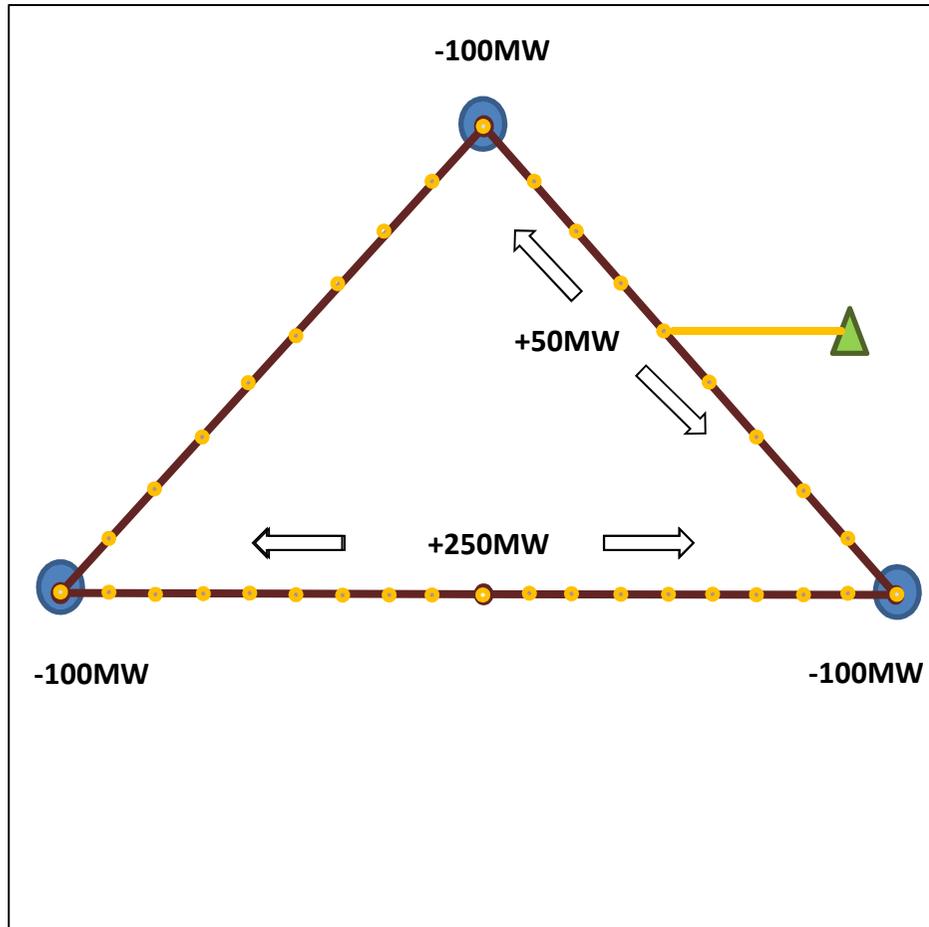
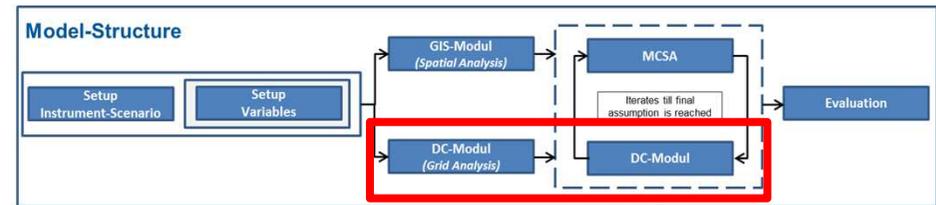


### Karten- darstellung:



# Das DC-Modul

## Kosten der Netzertüchtigung



- **Orientierung an DC-Load-Flow-Modellen zur Lastflussbestimmung**

(Schweppe et al. 1988, Todem et al. 2005, etc)

- Bestimmende Größe ist bei gleichen Spannungswinkeln nur der Widerstand R (Bestimmt sich aus der Distanz zw. zwei  $V \acute{s}$ )

$$PTDF_{ve} = \frac{\Delta y_e}{\Delta y_v}$$

- **Ermittlung von Kapazitätsüberschreitungen in den einzelnen Netzabschnitten**

$$cap_e^t = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V P_{jv} * PTDF_{ve}$$

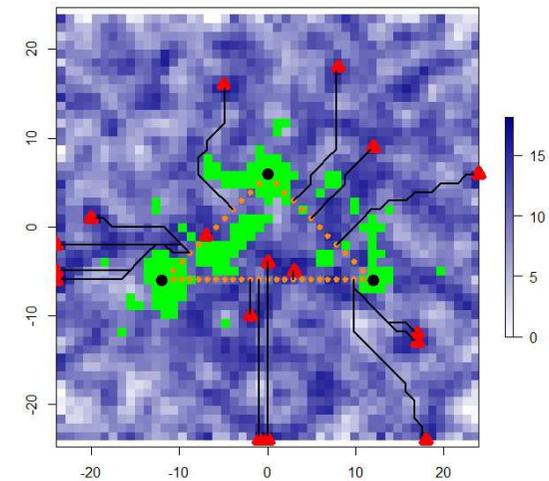
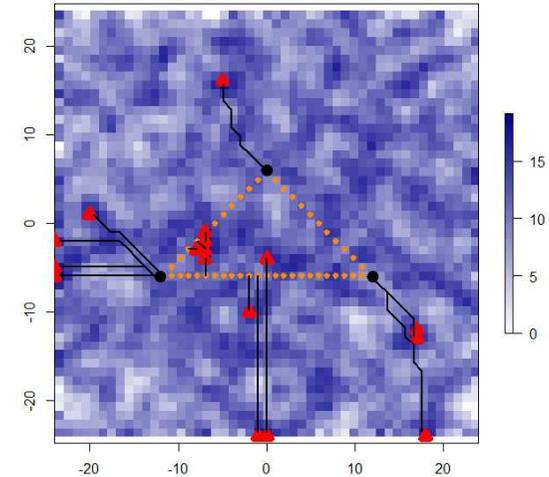
- **Ableitung der daraus resultierenden Kosten für die Netzertüchtigung  $C_{GE}$**

$$C_{GE} = \begin{cases} w_{GE} \sum_{e=1}^E cap_e^t - cap_e^{t=0} & \text{if } cap_e^t > cap_e^{t=0} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

# 4. Instrumenten-Szenarien

# Einführung von Landnutzungsinstrumenten

- **Ausweisung von Zellen, die aufgrund ihrer externen Kosten nicht bebaut werden dürfen**
  - Wohnumfeldschutz vs. sensible bzw. ökologisch wertvollen Flächen
  - Ausweisung von Eignungsgebieten (vollständige Information vs. zufällige Ausweisung)
  - Nutzung von Landnutzungsinstrumenten zur Begrenzung des weiteren Ausbaus in einer Region bzw. Einzugsgebiets (Verhinderungsplanung)



# Beteiligung des Produzenten an den Bestandsnetzkosten

- **Anpassung der Kostenfunktion des Produzenten**

$$c_n = c_P + c_{GC} + c_{GE}$$

- Kosten können dabei Netzknotenscharf (Nodal-Pricing) am jeweiligen Verknüpfungspunkt, oder regionsspezifisch im jeweiligen Einzugsgebiet auftreten (Marktzonen).



# Öko-EEG und Naturschutzrechtliche Ausgleichsregelung

- Anpassung der Standortförderung bzw. -abgabe in Abhängigkeit von den Standort-bezogenen Kosten
- Öko-EEG

$$\max_{\rho, y^s, c_P, c_{GC}} \pi = \rho(x_s) y^s - c_P - c_{GC}$$

- Naturschutzrechtliche Ausgleichsabgabe

$$\max_{y^s, c_P, c_{GC}, \tau} \pi = \rho y^s - c_P - c_{GC} - \tau(x_s)$$

# 5. Diskussion

# Diskussion

- **Welche maßgeblichen raumrelevanten Kriterien eines nachhaltigen Energiesystems werden bisher nicht betrachtet?**
- **Lassen sich weitere Instrumente zur Steuerung der Raumallokation identifizieren?**



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**