

Probabilistische Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit disponibler Kapazitäten im europäischen Elektrizitätsversorgungssystem

18. Symposium Energieinnovation, Graz

Markus von Heel, 15.02.2024

Einleitung

Motivation

Wandel des Elektrizitätsversorgungssystems

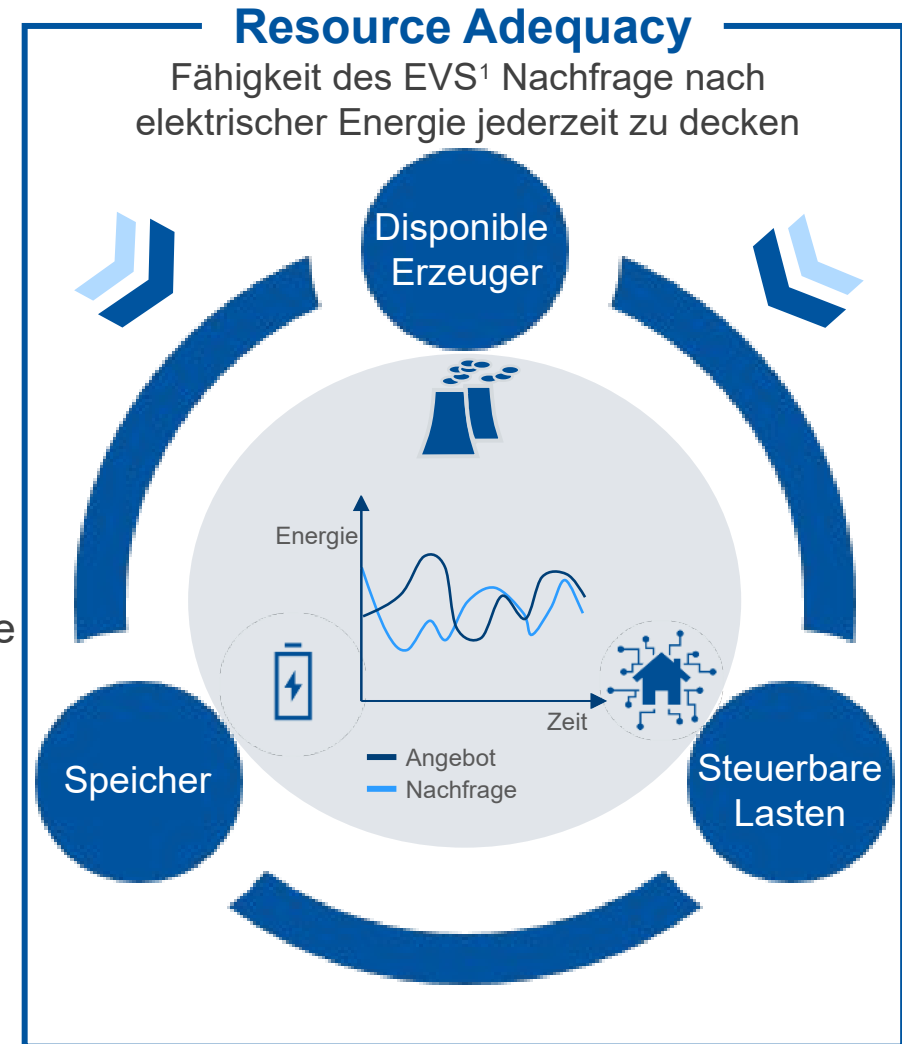
- Ausbau Erneuerbarer Energien und Stilllegung konventioneller Kraftwerke
 - Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien sind jedoch nur bedingt steuer- und abrufbar
- Nachfrage nach elektrischer Energie muss jederzeit gewährleistet werden

Bewertung der Versorgungssicherheit

- Disponible Kapazitäten zur Gewährleistung der Resource Adequacy notwendig
 - Marktbedingungen schaffen keinen stabilen Rahmen für Investitionen in disponible Kapazitäten
- Bei ausbleibenden Zubauten disponibler Kapazitäten Gefährdung der Resource Adequacy

Economic Viability Assessment

- Informationen über zukünftige disponible Kapazitäten zur Untersuchung der Resource Adequacy notwendig
 - Abbildung von Unsicherheiten, Risiken sowie Risikoaversion
- **Abbildung und Untersuchung der Anforderungen in einem EVA-Modell**



Einleitung

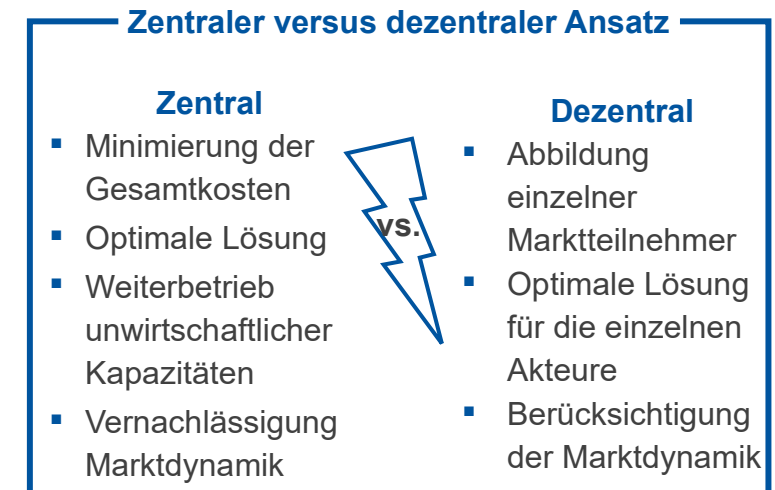
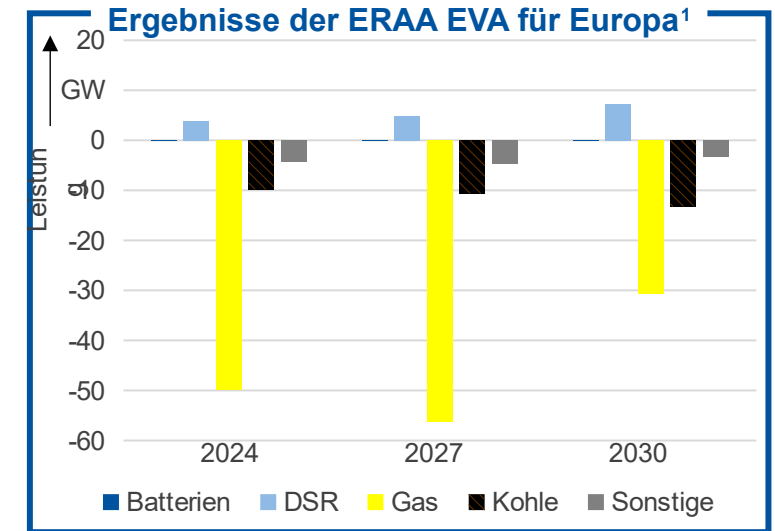
Status Quo

Economic Viability Assessment

- „Untersuchung der Wirtschaftlichkeit disponibler Kapazitäten am Energy-Only-Markt“
 - European Resource Adequacy Assessment (ERAA): Optimierungsmodell aus Sicht eines **zentralen** Planers zur Abschätzung der zukünftigen, disponiblen Kapazitäten
 - Allerdings gibt es in der Realität eine Vielzahl von Marktakteuren mit individuellen Risikopräferenzen sowie Unsicherheiten und somit **dezentrale** Entscheider
- Berücksichtigung dezentraler Entscheider in EVA-Modell notwendig

Dezentraler Ansatz

- Treffen von Investitionsentscheidungen auf rein wirtschaftlicher Basis
 - Berücksichtigung der Marktdynamik
 - Wechselwirkungen zwischen den Einsätzen und Preisen sowie Zu- und Abbauentscheidungen bei einer Vielzahl an Marktakteuren
 - Bildet die marktbasierende Entwicklung von Kapazitäten adäquat ab
- **Abbildung der Realität in Zu- und Abbauentscheidungen der Marktakteure zur Abschätzung zukünftiger Kapazitäten durch dezentralen Ansatz gegeben**



Ziel des Beitrages

Vorstellung dezentrales Modell zur Bewertung disponibler Kapazitäten im europäischen Elektrizitätsversorgungssystem und Erweiterung um folgende Punkte:

Kernpunkte

- 1 Probabilistische Bewertung der Wirtschaftlichkeit
- 2 Abbildung von länder- und technologiespezifischen Risiken
- 3 Abbildung der Risikoaversion

Investitionsrechnung nach finanzmathematischen Grundlagen

- Ansatz zur Entscheidungsfindung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit notwendig

Net Present Value

- Abzinsung zukünftiger Zahlungsflüsse auf die Gegenwart
- Inframarginal Rent: Einnahmen, die nach Abzug der variablen Kosten sowie variablen Betriebs- und Wartungskosten verbleiben
- Bei positivem NPV ist die Investition rentabel

Internal Rate of Return

- Projektspezifischer Zinssatz, welcher den NPV auf Null bringt
- Bei positiver IRR wird die Investition durchgeführt
- Ermöglicht den Vergleich von Investitionen mit unterschiedlichen Laufzeiten

Erweiterungen in diesem Beitrag

- Länder- und technologiespezifisches Risiko
- Risikoaversion

Asset Valuation Problem

Bestimmung des Gegenwartswertes einer zukünftigen Zahlungsreihe

Net Present Value

$$NPV = -I + \sum_{t=1}^K \frac{IR_t}{(1+r)^t}$$

IR = Inframarginal Rents,
K = Projektlaufzeit,
r = Zinssatz

Internal Rate of Return

$$0 = \sum_{t=1}^K \frac{IR(t)}{(1+IRR)^t}$$

IRR = Internal Rate of Return

Grundlagen

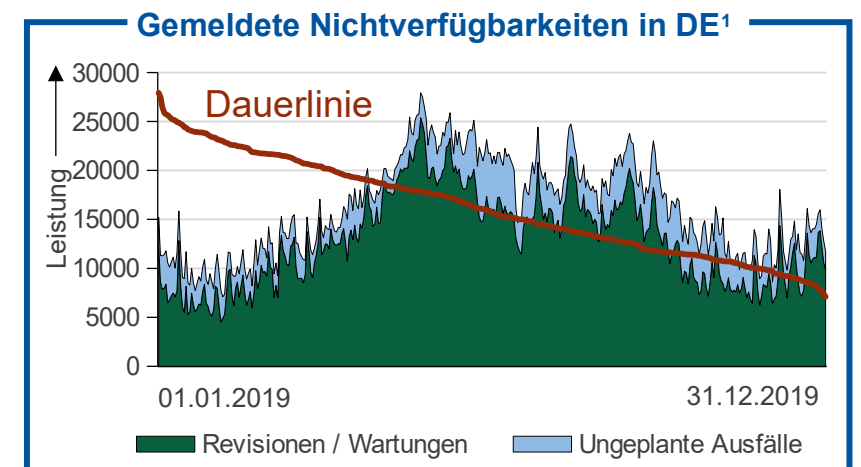
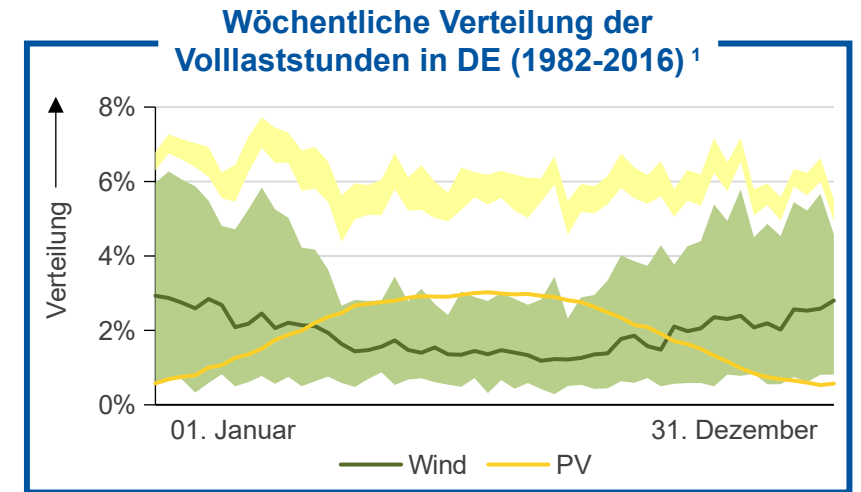
Probabilistische Bewertung

Kurzfristige Unsicherheiten

- Einspeisung aus EE-Anlagen volatil und dargebotsabhängig
 - Nachfrage nach elektrischer Energie u.a. von Umgebungstemperatur abhängig
 - Nicht-Verfügbarkeiten (Ausfälle) von thermischen Kraftwerken limitieren Einsatz
 - Ausfälle und Wetter über Vielzahl an (historischen) Werten abbildbar
- **Kurzfristige Unsicherheiten beeinflussen v.a. den Dispatch**
- **Berücksichtigung kurzfristiger Unsicherheiten als stoch. Unsicherheit**

Stochastische Unsicherheiten

- Kombination an Ausfall- und Wetterjahren zur Modellierung der stochastischen Unsicherheiten
 - Für probabilistische Resource Adequacy Untersuchungen eine hohe Anzahl an Ausfall- und Wetterjahre notwendig
 - Probabilistische Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt ebenso für die gleiche Anzahl an Ausfall- und Wetterjahren
- **Abbildung stochastischer Unsicherheiten über mehrerer Ausfall- und Wetterjahre**



Grundlagen

Länder- und technologiespezifische Risiken

Länder- und technologiespezifische Risiken

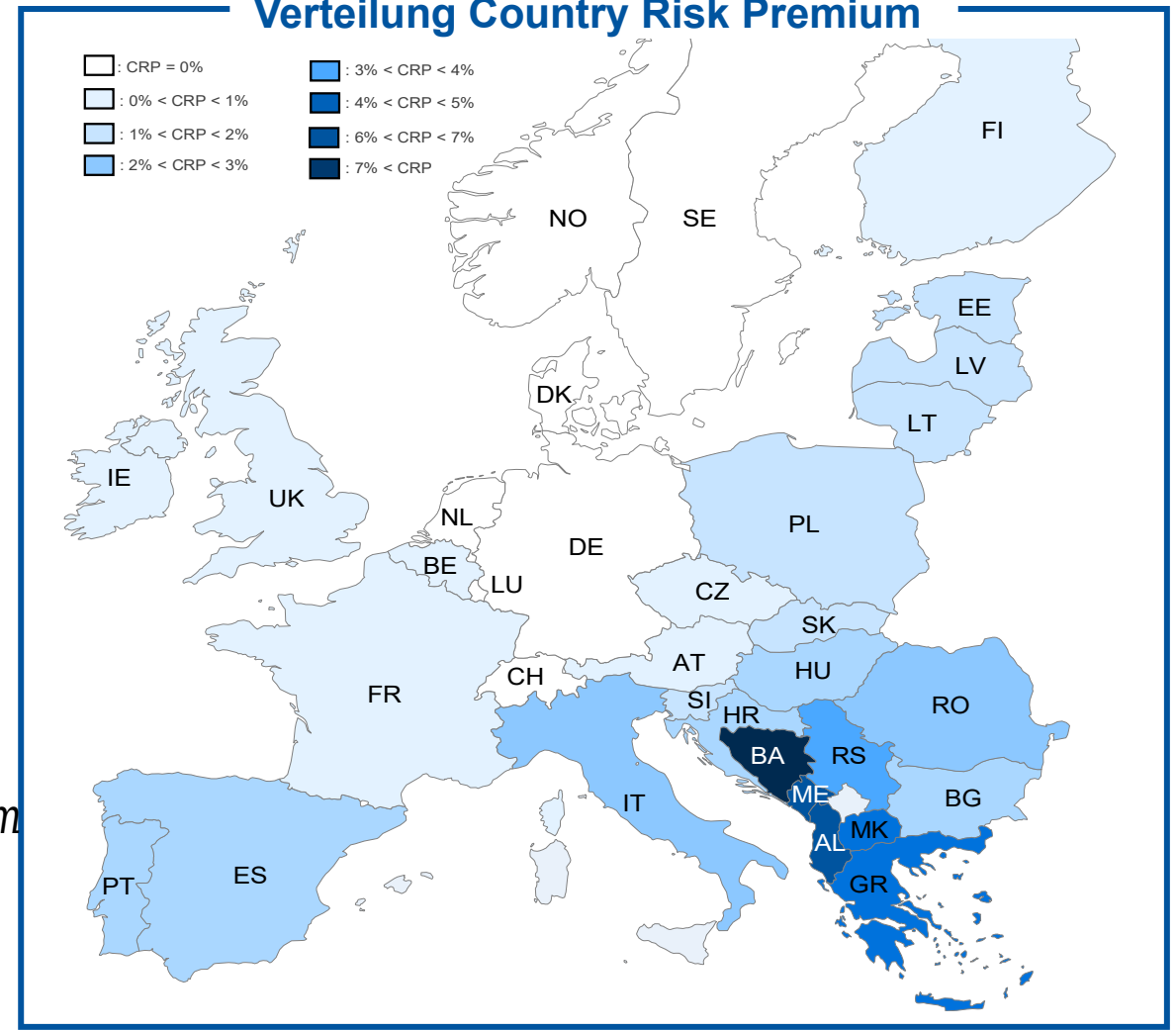
- Variierenden politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zwischen europäischen Ländern
- Differenzierte Festlegung von Mindestrenditen um spezifische Risiken und Chancen jedes Landes abzubilden
- Unterschiedliche Stromerzeugungstechnologien weisen unterschiedliche Renditeprofile auf
- Anpassung von Mindestrenditen an die jeweilige Technologie zur gezielten Darstellung des Rendite-Risiko-Verhältnis

Hurdle Rate Approach

- Heuristische Festlegung des technologiespezifischen Hurdle Premiums¹ und der Kapitalkosten (WACC²)
 - Country Risk Premium (CRP) wird jährlich empirisch ermittelt³
- Hurdle Rate = WACC¹ + Hurdle Premium + Country Risk Premium*

- Die Einführung der Hurdle Rate erlaubt die Abbildung länder- und technologiespezifischer Risiken bei der (De-) Investitionsentscheidung

Verteilung Country Risk Premium



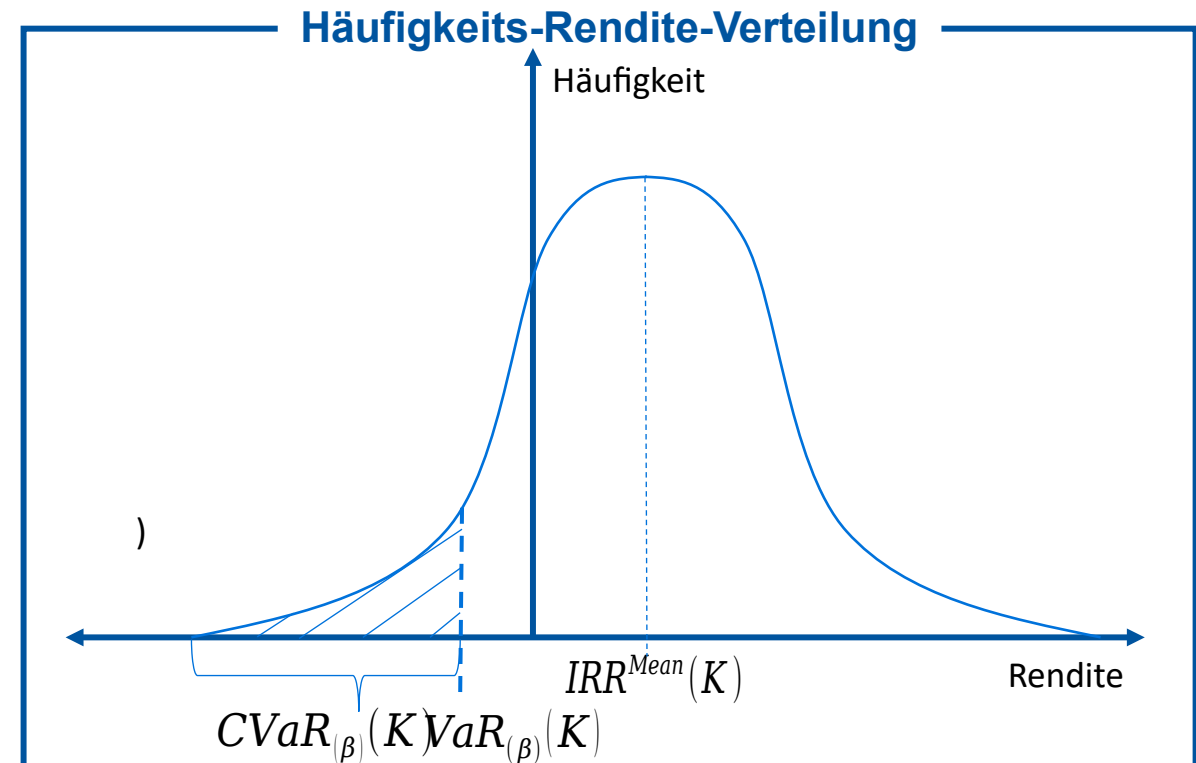
1. Entwickelt von Prof. K. Boudt
2. WACC: Weighted Average Cost of Capital
3. Entwickelt von Prof. Damodaran

Berücksichtigung der Risikoaversion

- Ermittlung des Verlustrisiko für jede Kapazität
- Berechnung eines Präferenzwerts unter Berücksichtigung der Gewichtung des Verlustrisikos in Abhängigkeit des Risikoprofils
- Bestimmung des Gewichtungsparmeters

Mathematische Modellierung der Risikoaversion

- Erweiterung der Erwartungswertbetrachtung und Quantifizierung des Verlustrisikos
- **Value at Risk (VaR)** definiert die Rendite, die mit einer Wahrscheinlichkeit von β nicht unterschritten wird
- **Conditional Value at Risk (CVaR)** stellt die erwartete Rendite aller Möglichkeiten dar, die den VaR unterschreiten
- **Risikoaversionparameter** dient als Maß dafür, wie stark die individuelle Risikoaversion in die Entscheidungsfindung einfließen soll



$$\text{Präferenzwert} = (1 - \alpha) * IRR^{Mean}(K) + \alpha * CVaR_{(\beta)}(K)$$

Eine Kapazität ist dann wirtschaftlich, wenn folgendes gilt:

Modellierung

Grundlagen des Verfahrens

Probabilistisches Verfahren

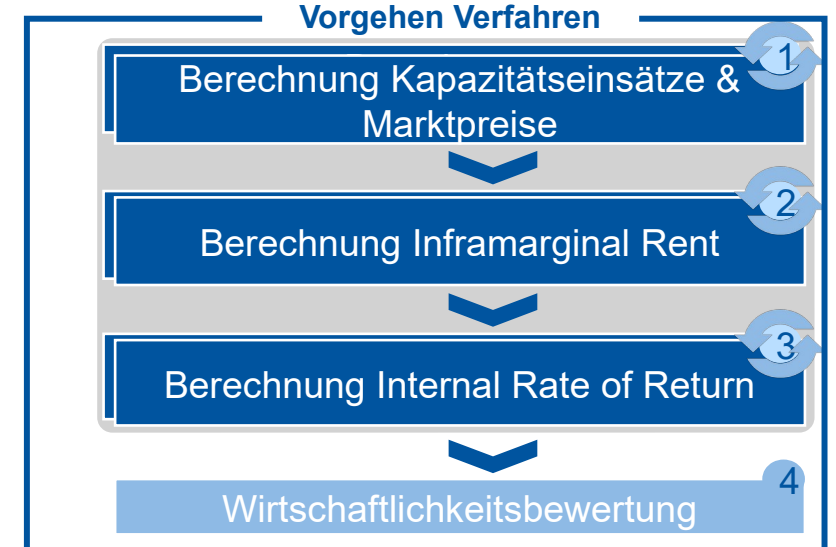
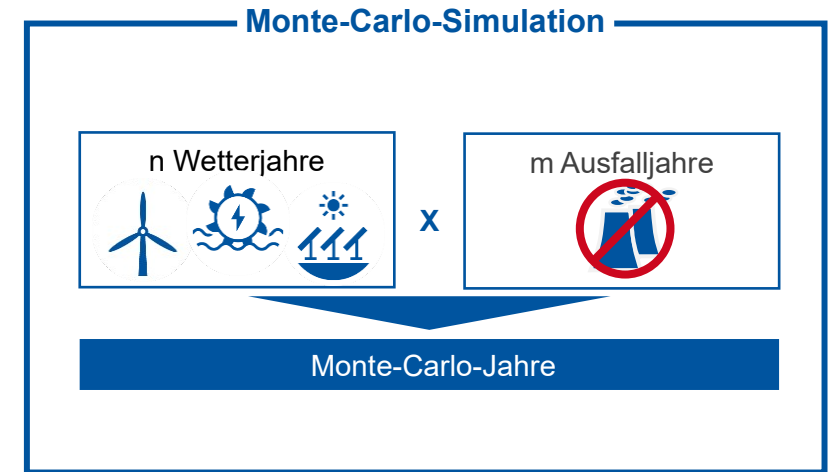
- Zukünftige klimatische Bedingungen sowie Ausfälle von Kapazitäten werden über Szenarien abgebildet
- Vielzahl historischer Werte und simulierter Jahre ermöglicht, dass der empirisch ermittelte Durchschnittswert der Untersuchung gegen den erwarteten Wert konvergiert

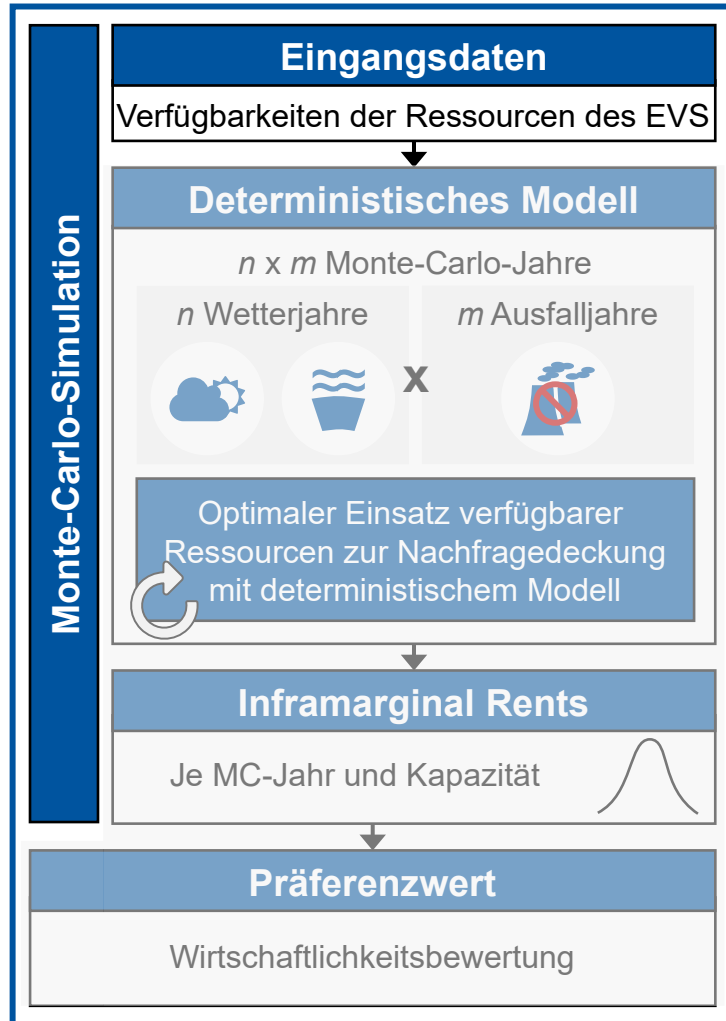
→ Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation

Vorgehen des Verfahrens

- Fokus auf disponiblen Kapazitäten
- Probabilistischer Teil des Verfahrens
 - Berechnung der stündlichen Kapazitätseinsätze und Marktpreise
 - Berechnung der Inframarginal Rent
 - Berechnung der Internal Rate of Return
- Wirtschaftlichkeitsbewertung der disponiblen Kapazitäten: Eine Kapazität ist wirtschaftlich, wenn der Erwartungswert aller Internal Rate of Returns positiv ist

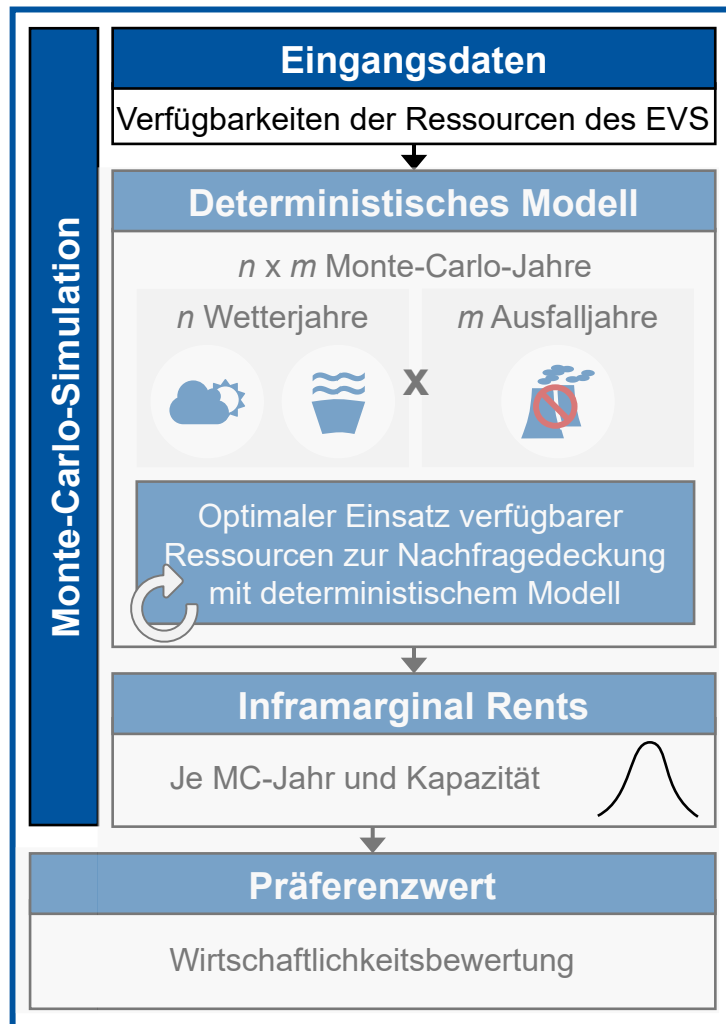
→ Wirtschaftlichkeitsbewertung berücksichtigt nicht die länder- und technologiespezifischen Risiken sowie Risikoaversion





Deterministische Verfügbarkeiten

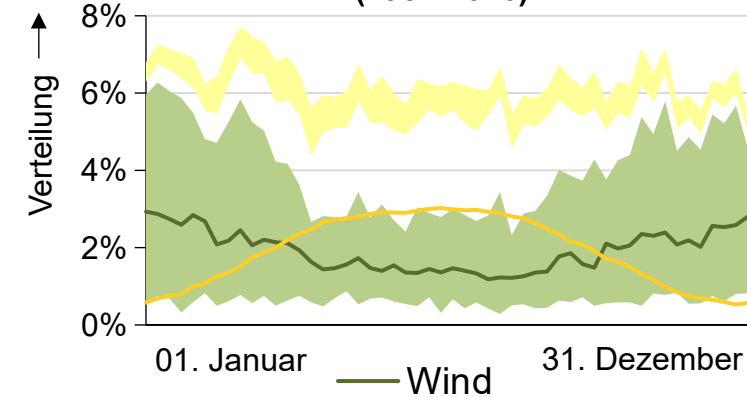
- Installierte Kraftwerks- und Speicherkapazitäten (hydraulische (Pump-)Speicherkraftwerke sowie Batteriespeicher)
- Installierte Leistung an EE-Anlagen (Onshore- & Offshore-Windenergieanlagen, Photovoltaik, Biomasse, Laufwasser)
- Flexibilitätsoptionen auf Nachfrageseite (DSM¹/DSR², Elektrolyseure)
- Restriktionen des Stromhandels (Flow-based Domain (FBMC³) / Nettohandelskapazitäten)
- Weitere Restriktionen (z. B. vorzuhaltende Regelreserve, Energiemengenrestriktion, etc.)



Wetterjahre

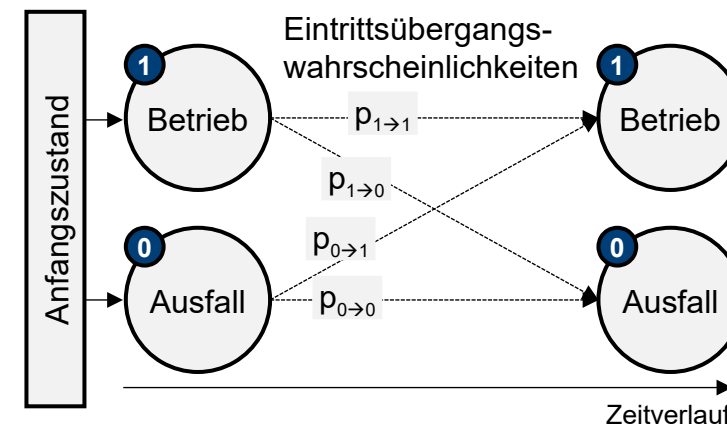
- Zeitreihen auf Basis histor. Wetterjahre
- Umfasst Erzeugungsprofile für EE-Anlagen, Zuflusszeitreihen für hydraulische (Pump-)Speicherkraftwerke, KWK-Verpflichtungen von thermischen Kraftwerken sowie Zeitreihen für die Last

Wöchentl. Verteilung der Volllaststunden in DE (1982-2016)¹



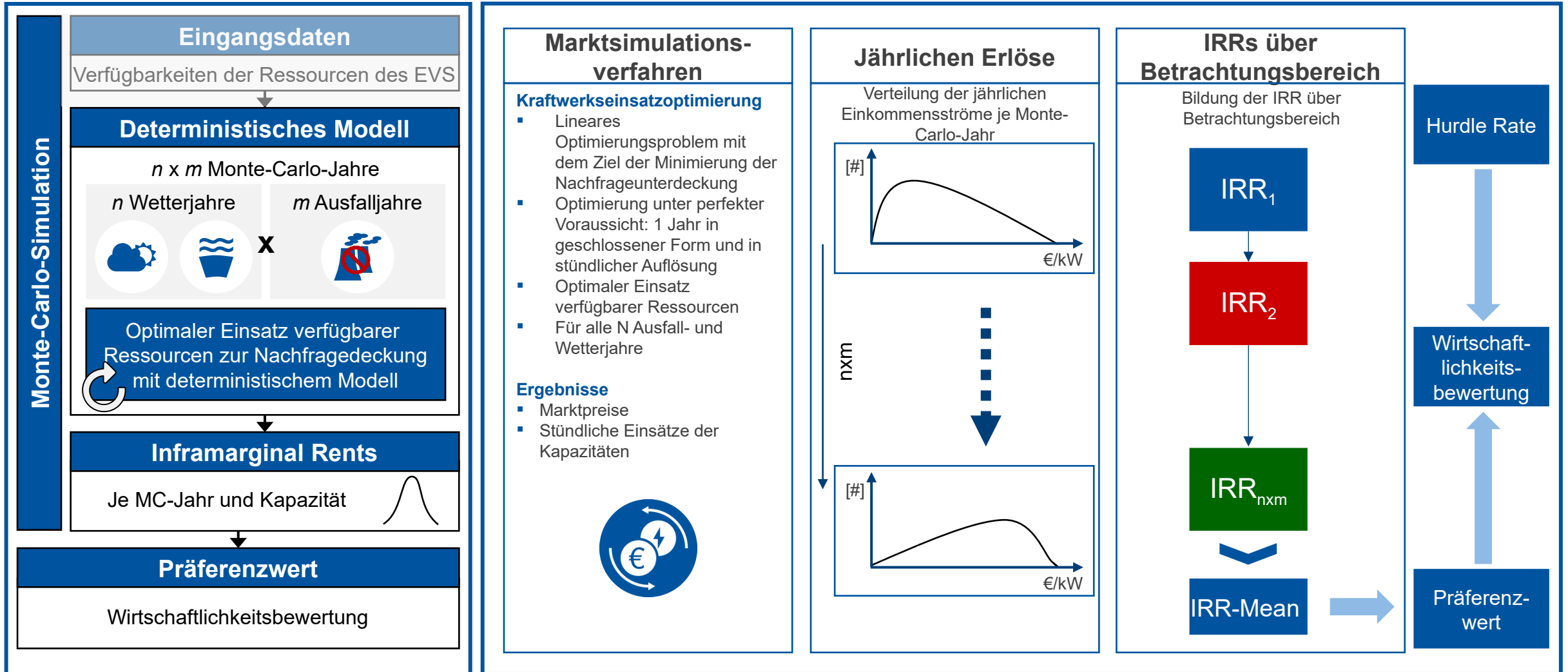
Ausfalljahre

- Stochastische Nicht-Verfügbarkeiten aus Ausfallziehung auf Basis von Markov-Ketten
- Berechnung der Eintrittsübergangswahrscheinlichkeiten auf Basis der durchschnittlichen Verfügbarkeit und der Ausfalldauer



Modellierung

Economic Viability Assessment



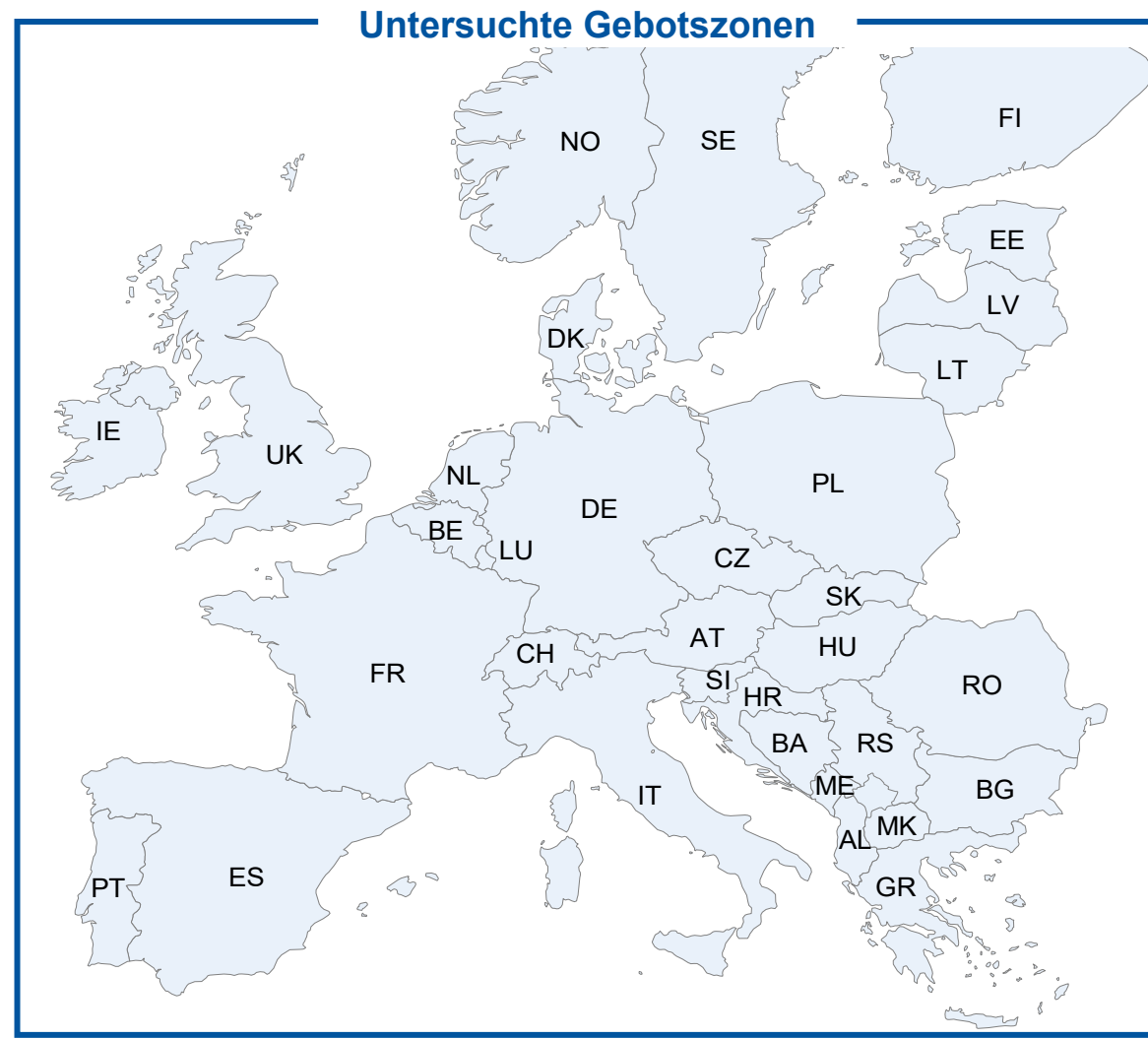
Ergebnisse

Untersuchungsrahmen

Untersuchungsrahmen

- Betrachtung des Jahres 2024
- 100 Monte-Carlo-Jahre → Zehn Klima- & zehn Ausfalljahre
- Untersuchung der Gebotszonen der Mitglieder von ENTSO-E¹
- Daten gemäß ERAA² 2022
- Drei Berechnungen der Wirtschaftlichkeit für disponible Kapazitäten wurden durchgeführt:
 1. Referenzszenario
 2. Untersuchung des länder- und technologiespezifischen Risikos
 3. Untersuchung der Risikoaversion

Kandidaten	Kapazitätstyp	WACC [%]	Hurdle Premium [%]	Hurdle Rate inkl. CRP [%]
Stilllegung	Gas	6,8	1,5	8,3 – 18,16
	Braunkohle	6	1,5	7,5 – 17,36
	Steinkohle	6	1,5	7,5 – 17,36
	Öl	6,8	1,5	8,3 – 18,16
Zubau	Batterie	6	8,5	14,5 – 24,36
	Gas	6,8	6,5	13,3 – 22,66
	DSR ³	14		14 – 23,86



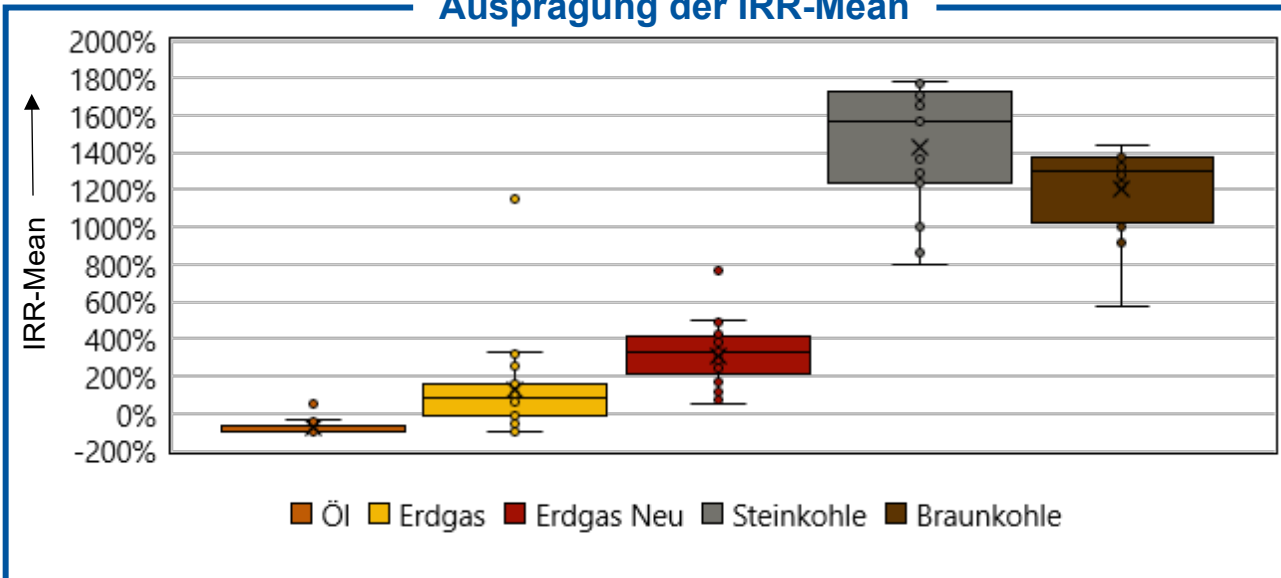
Ergebnisse

Referenzszenario

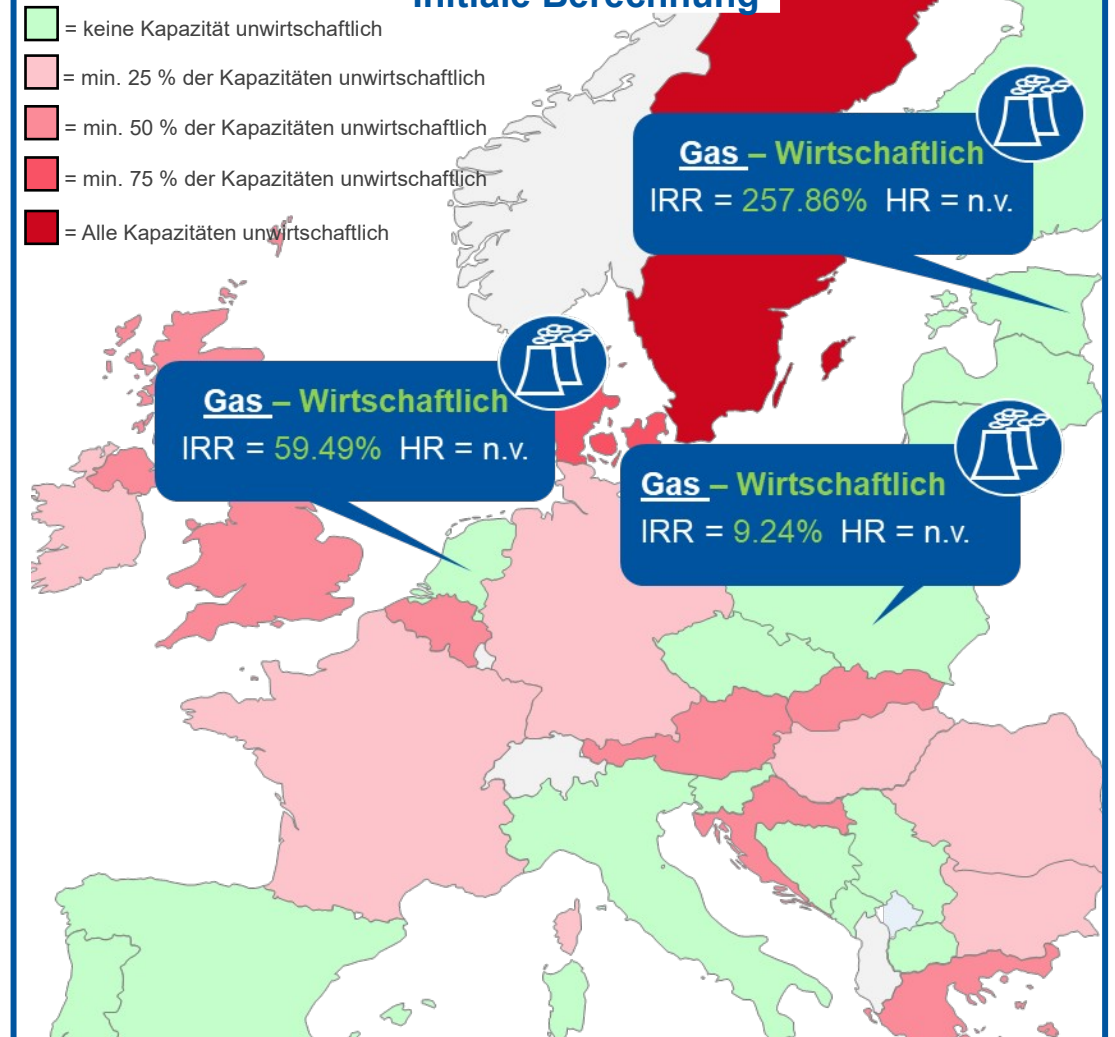
Initiale Berechnung

- Kein Präferenzwert für die jeweiligen Kapazitäten
- Kriterium für Wirtschaftlichkeit ist positiver IRR-Mean
- Vergleichsrechnung für die getätigten Erweiterungen
 - Keine Berücksichtigung der länder- und technologiespezifischen Risiken
 - Keine Berücksichtigung der Risikoaversion

Ausprägung der IRR-Mean



Initiale Berechnung








Ergebnisse

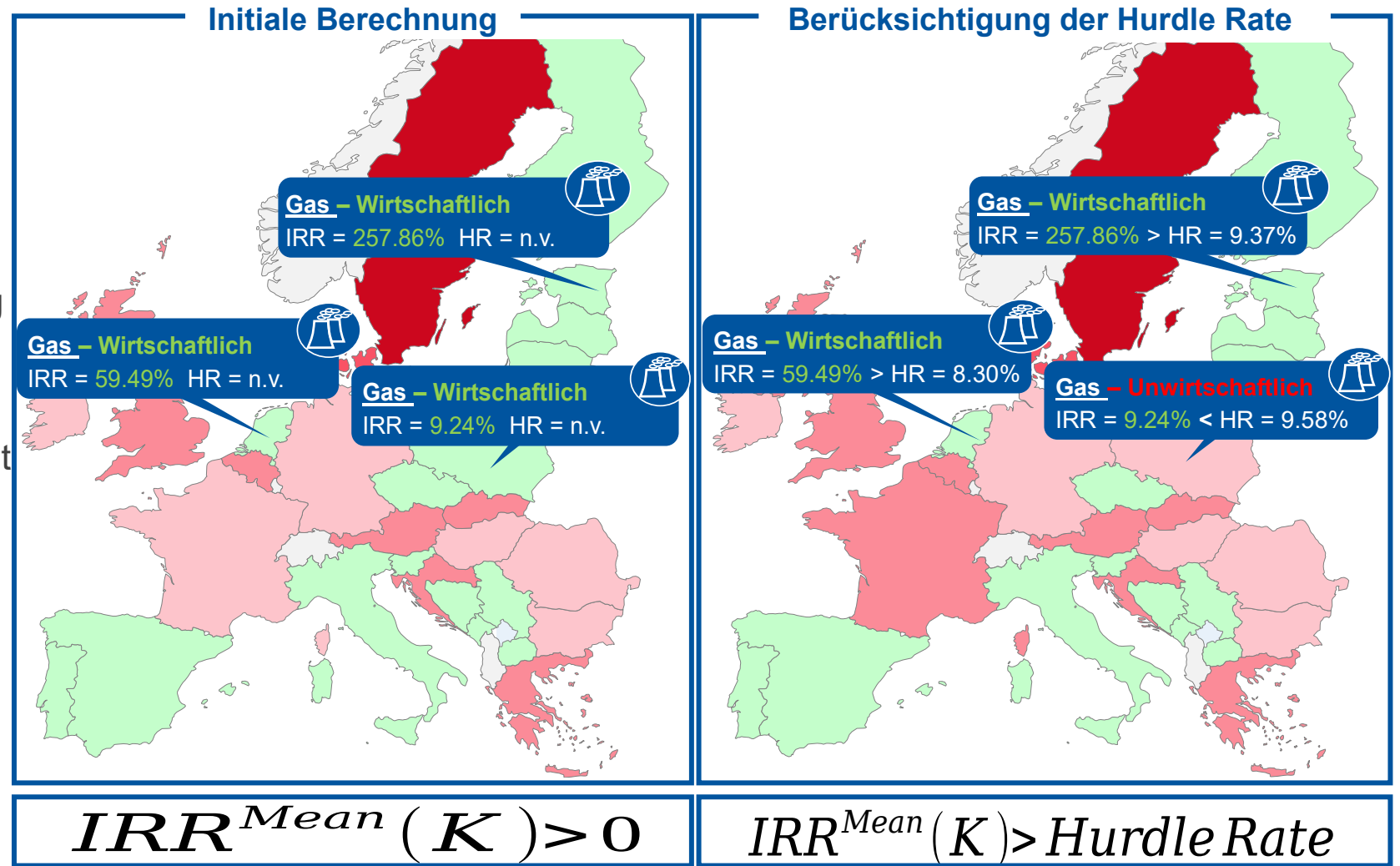
Länder- und technologiespezifische Risiken

Erweiterung Hurdle Rate

- Berücksichtigung länder- und technologiespezifisches Risiko
- IRR-Mean bleibt für alle Kapazitäten konstant
- Im Vergleich zur initialen Berechnung werden zwei weitere Kapazitäten unwirtschaftlich
- Die Erweiterung der Hurdle Rate trägt zu einer praxisnäheren Bewertung der Wirtschaftlichkeit bei

Legende

-  = keine Kapazität unwirtschaftlich
-  = min. 25 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
-  = min. 50 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
-  = min. 75 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
-  = Alle Kapazitäten unwirtschaftlich

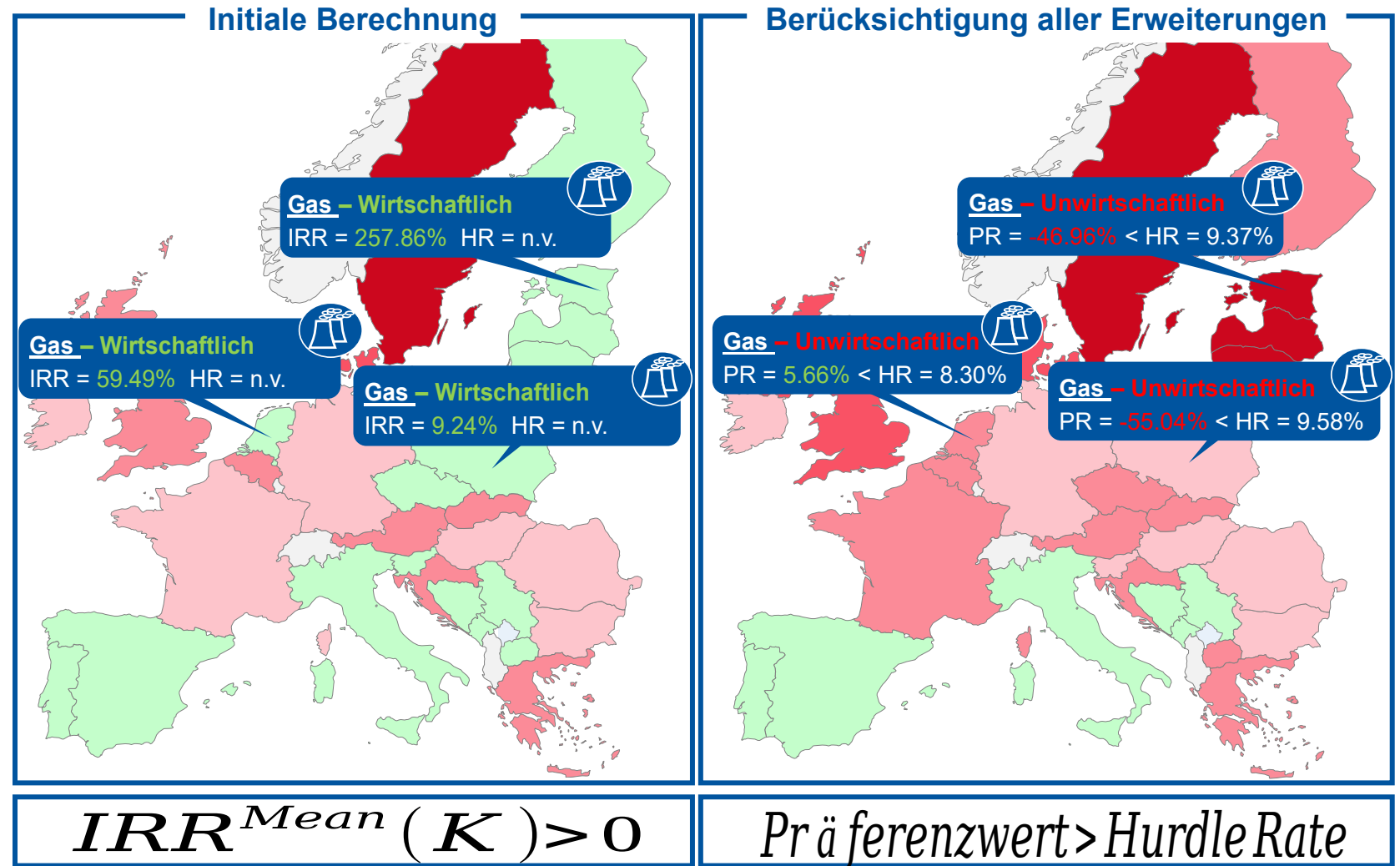


Erweiterung Risikoaversion

- Berücksichtigung Risikoaversion
- Zwölf weitere Kapazitäten zusätzlich unwirtschaftlich
- Je nach Szenario sehr unterschiedliche Rendite. Starke Ausprägung der Risikoaversion in Abhängigkeit des Aversionsparameter möglich
- Die Erweiterungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Legende

- = keine Kapazität unwirtschaftlich
- = min. 25 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
- = min. 50 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
- = min. 75 % der Kapazitäten unwirtschaftlich
- = Alle Kapazitäten unwirtschaftlich



Zusammenfassung

Hintergrund und Motivation

- Abschätzung disponibler Kapazitäten zur Untersuchung der Resource Adequacy notwendig
- Bei wirtschaftlicher Bewertung disponibler Kapazitäten müssen Unsicherheiten und Risikoaversion berücksichtigt werden

Kernpunkte dieses Beitrages

- Probabilistische Bewertung der Wirtschaftlichkeit
- Abbildung länder- und technologiespezifischer Risiken
- Abbildung der Risikoaversion

Ausblick

- Zukünftige Untersuchungen: Konkrete Risikoaversionsparameter, mehr Klimajahre
- Erweiterungen des Verfahrens: Mehr-Jahres-Betrachtung

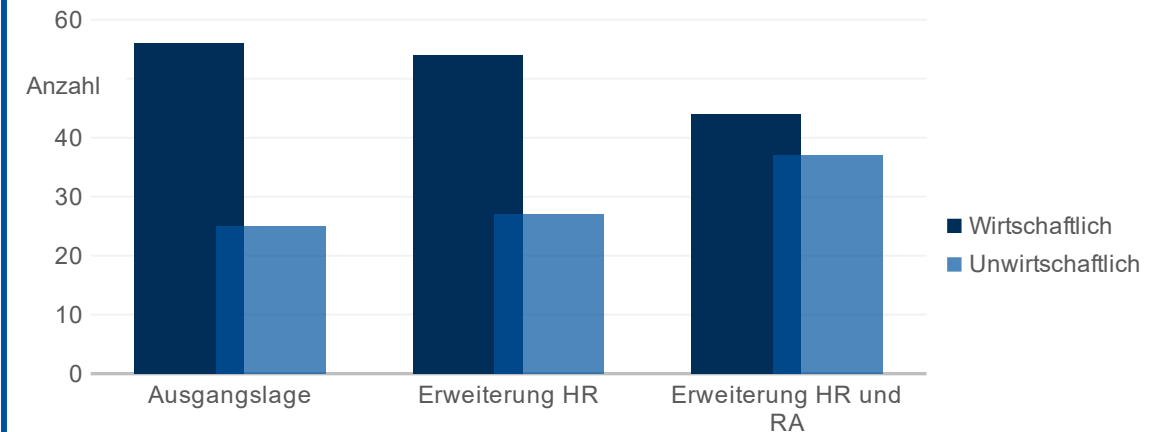
Exemplarische Untersuchungen

Erweiterung Hurdle Rate

- Ermöglicht die Renditebewertung einer Kapazität unter Berücksichtigung von länder- und technologiespezifischer Risiken

Erweiterung Risikoaversion

- Die Erweiterung der Risikoaversion ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung über rein finanziellen Metriken hinaus



Die Erweiterungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbewertung und sind zwingend zu berücksichtigen

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**