

Optimierter Einsatz von Adiabaten und Diabaten Druckluftspeichern

Rupert Hartel, D. Keles, M. Genoese, D. Möst, W. Fichtner
EnInnov 2010, Graz 11.02.2010

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Lehrstuhl für Energiewirtschaft



Gliederung

1. **Einleitung**
2. **Ziel**
3. **Grundlagen**
4. **Methodik**
5. **Ergebnisse**
6. **Zusammenfassung und Ausblick**

Einleitung

Warum werden neue Speichertechnologie benötigt?

- Zunahme fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien
- Stromerzeugung korreliert nicht mit der Last
- Stromüberschuss oder –mangel
- Bedarf an neuen Speichersystemen



Welche Speichertechnologie?

Druckluftspeicher sind eine vielversprechende Großspeichertechnologie

Was entscheidet über den Einsatz dieser Technologie?

Gliederung

1. Einleitung
- 2. Ziel**
3. Grundlagen
4. Methodik
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung und Ausblick

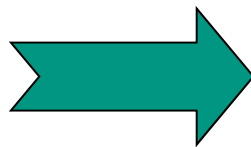
Ziel

Frage:

Ist der Einsatz von Druckluftspeicher wirtschaftlich?

Antwortfindung:

- Adiabate und Diabate Druckluftspeicher
 - Techno-ökonomische Parameter
- Historische Analyse des Jahres 2008
 - Markdaten: Spot-Markt-Preise, Leistungspreise für Minutenreserve, CO₂-Preise und Gas-Preise



Optimierungsmodell:

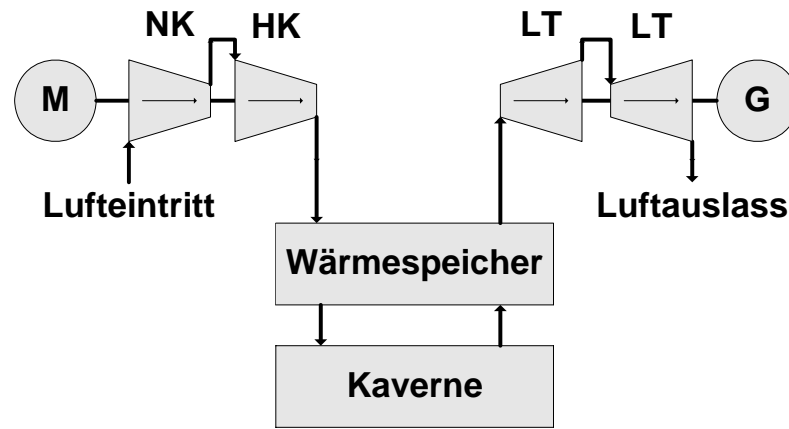
- Zeitraum: 1 Jahr
- Maximierung des Deckungsbeitrags
- Gemischt ganzzahlige Optimiermodell
- Implementiert in GAMS
- ***Bewertung über Kapitalwert***

Gliederung

1. Einleitung
2. Ziel
3. **Grundlagen**
4. Methodik
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung und Ausblick

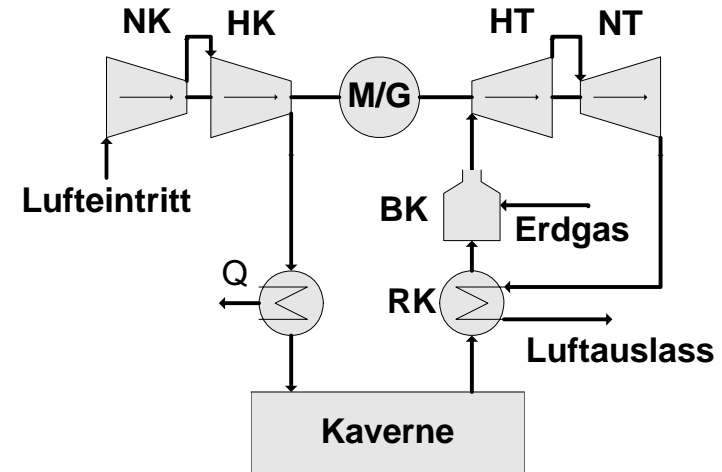
Grundlagen: Technik

Adiabate und Diabate Druckluftspeicherkonzepte



Charakteristika:

- + keine Emissionen
- + höher Gesamtwirkungsgrad 70%
- + Unabhängigkeit von Brennstoffpreisen
- Geringerer Arbeitsbereich
- Hohe spez. Investitionen



Charakteristika:

- + größerer Arbeitsbereich
- + geringe spez. Investitionen
- Geringer Gesamtwirkungsgrad 57%
- Keine Verwendung der Kompressionswärme
- Abhängig von Brennstoff- und CO₂-Preisen
- Kein reiner Speicher

Grundlagen: Einkommensquellen

Spotmarkt:

- „Day Ahead“ Aktion
- Stündliche Auflösung
- Täglicher Handel



Spotmarkt:

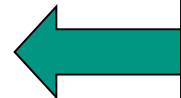
- Günstigen Strom einkaufen
- Strom bei hohen Preisen verkaufen
- Erlös durch Differenz

Primär- und Sekundärregelleistung:

- Kurze Ansprechzeiten
- Druckluftspeicher erfüllen die Präqualifikation nicht
- Monatlicher Handel

Tertiärregelleistung:

- Vorhalten von Reserveleistung
- Lieferung bei Abruf der Leistung
- Leistungspreise
- Arbeitspreise



Tertiärregelleistung:

- min. 15 MW Leistungsgebot
- volle Leistung in 15 Minuten
- positive und negative Reserveleistung
- Täglicher Handel

Gliederung

1. Einleitung
2. Ziel
3. Grundlagen
- 4. Methodik**
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung und Ausblick

Methodik (I)

Das Optimierungsmodell:

Zielfunktion:

$$MAX DB = \sum_{h=1}^{8760} \left\{ \begin{array}{l} x_{Turbine}(h) \cdot p_{spot}(h) + \\ x_{Re.reserve}(zS) \cdot p_{Re.reserve,min}(zS) - \\ x_{Kompressor}(h) \cdot p_{spot}(h) - \\ x_{loadup,Turbine}(h) \cdot c_{loadup,Turbine} - \\ x_{loadup,Kompressor}(h) \cdot c_{loadup,Kompressor} - \\ x_{spot}(h) \cdot c_{var,Turbine} - \\ x_{compress}(h) \cdot c_{var,Kompressor} - \\ x_{spot}(h) \cdot p_{Gas}(h) \cdot W\ddot{a}rmerate - \\ x_{spot}(h) \cdot p_{CO_2}(h) \cdot EF_{gas} \cdot W\ddot{a}rmerate \end{array} \right\}$$

Erlöse Spotmarkt
Erlöse Reservemarkt
Kosten Spotmarkt
Kosten Laständerung Turbine
Kosten Laständerung Kompressor
Variable Kosten Turbine
Variable Kosten Kompressor
Kosten für Brennstoff
Kosten für CO₂-Zertifikate

Legende:

x= Leistung [MW]
p= Preise [€/MW]
c= Kosten [€/MW]
Wärmerate [MW_{in}/MW_{out}]
EF= Emissionsfaktor [kg/MW]
E= gespeicherte Energie
C₀= Kapitalwert
DB= Deckungsbeitrag
O&M= Wartungskosten
T= Wirtschaftliche Lebensdauer
i= Zins
I₀=Investition

Ausgewählte Nebenbedingungen:

$$E(h) = E(h-1) + x_{Kompressor}(h) \cdot Erdgasfaktor - x_{Turbine}(h) \quad \forall \quad E_{min} \leq E(h) \leq E_{max}$$

Energiespeicheränderung

$$x_{Re.reserve}(zS) \leq \min_{h' \in ts} \left[\frac{1}{4} (E(h) - x_{Turbine}(h')) \right] \quad \forall zS \in ZS$$

Angebot Reserveleistung

$$x_{Turbine,min} \leq x_{Turbine}(h), x_{Re.reserve}(zS) \quad \forall \quad x_{Re.reserve}(zS) = 0, x_{Turbine}(h) = 0 \quad \forall h \in ZS$$

Leistungsbeschränkung Turbine

Kapitalwert:

$$C_0 = (DB - O \& M) \frac{(1+i)^T - 1}{(1+i)^T \cdot i} - I_0$$

Methodik (II)

Modelldaten:

Technoökonomische Anlagenparameter*	Diabat	Adiabat
Speichervolumen [MWh]	1.000	1.000
Investitionssumme [Mio. €]	165	210
Wartungskosten [€/MW _{Turbine} *a]	9.000	10.000
Maximale Kompressorkapazität [MW]	150	150
Maximale Turbinenkapazität [MW]	300	300
Wirkungsgrad [%]	57	70
Wirtschaftliche Lebensdauer [a]	35	35
Anfahrkosten Turbine u. Kompressor [€/MW _{loadup}]	15	15
Minimale Kompressorkapazität [%]	60	80
Minimale Turbinenkapazität [%]	40	40
Variable Kosten [€/MWh]	1,00	1,00
Wärmerate [MWh _{in} / MWh _{out}]	1,17	0
Erdgasfaktor [MWh _{out} / MWh _{in}]	1,49	0

Marktdaten:

- Spotmarktpreise
- Reserveleistungspreise
- CO₂-Preise
- Brennstoffpreise

Annahmen:

- Keine negative Reserve
- Keine Arbeitspreise
- Minimale Leistungspreise
- Risikoaverser Akteur

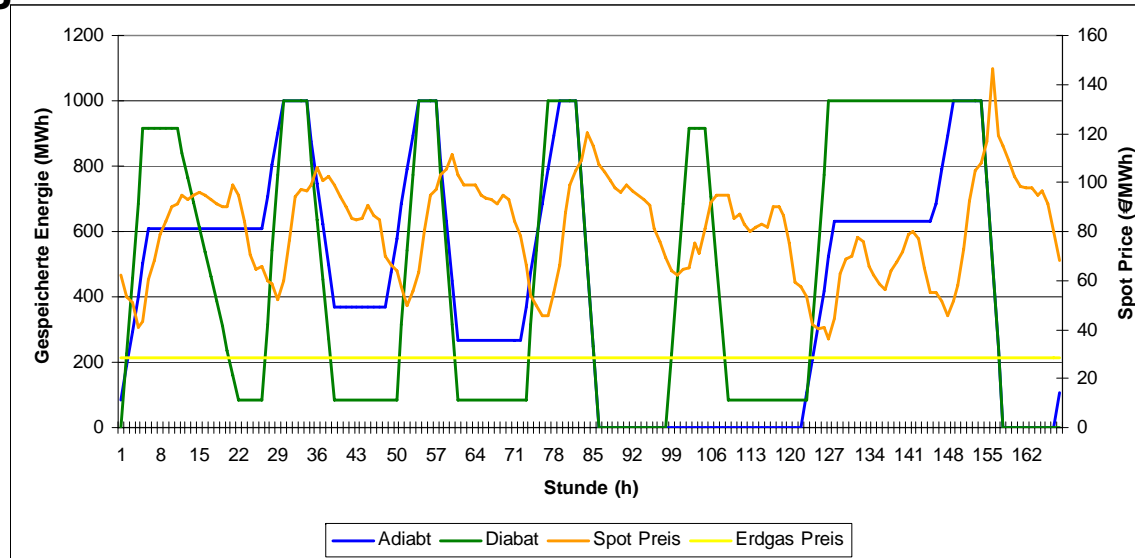
* Gatzert 2008: „The Economics of Power Storage - Theory and Empirical Analysis for Central Europe“

Gliederung

1. Einleitung
2. Ziel
3. Grundlagen
4. Methodik
- 5. Ergebnisse**
6. Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse (I)

Referenzkonfiguration:

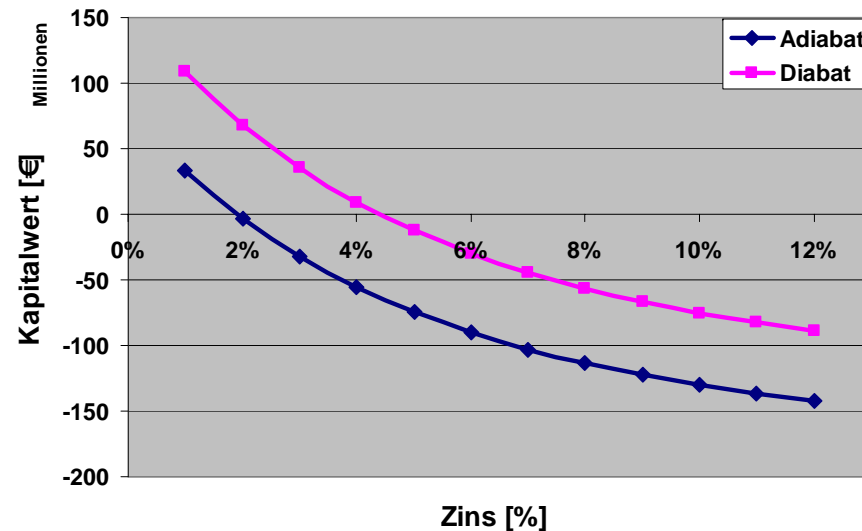


Druckluftspeicherkraftwerk	Diabat	Adiabat
Ökonomische Ergebnisse		
Deckungsbeitrag [Mio. €]	12,03	11,26
Spotmarkterlöse [Mio. €]	25,27	16,87
Erlöse aus dem Reservemarkt [Mio. €]	4,16	4,87
Kosten [Mio. €]	17,41	10,49
Betriebsverhalten		
Betriebsstunden Turbine am Spotmarkt [h]	853	554
Betriebsstunden Kompressor am Spotmarkt [h]	1.115	1.584
Angebotsstunden am Reservemarkt [h]	3.204	3.756

- Ähnlicher Deckungsbeitrag
- Unterschiedliche Erlös-/Kostenstruktur
- Unterschiedliche Auslastung
- Adiabat: Spanne Niedrige u. Hohe Spotpreise
- Diabat: Spanne niedrige u. hohe Spotpreise/Spanne Hohe Spotpreise und niedrige Erdgas Preise

Ergebnisse (II)

Kapitalwerte der Referenzkonfigurationen:

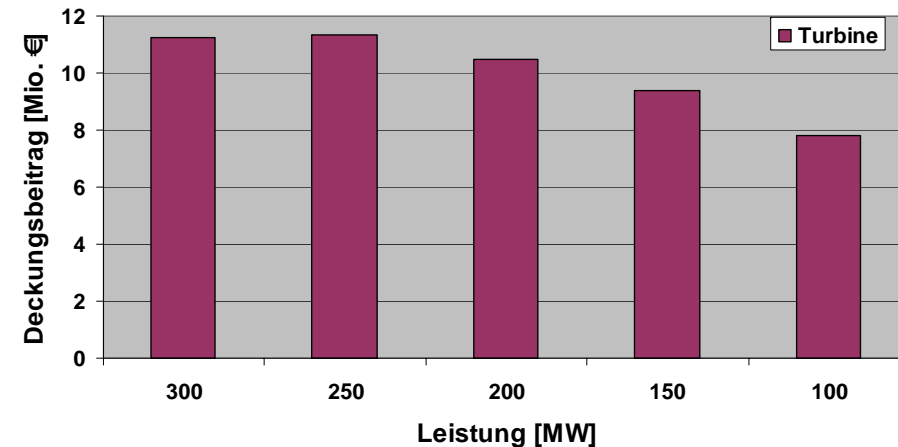
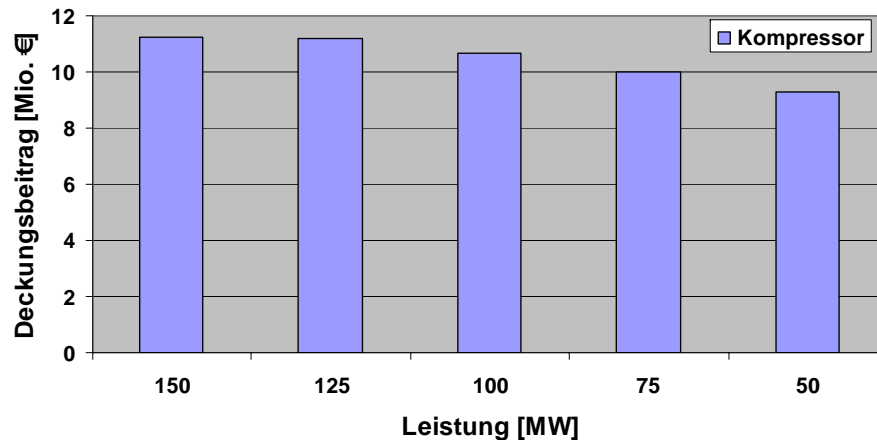


- Negative Kapitalwerte bei üblichen Zinserwartungen
- Diabate Druckluftspeicher haben höheren Kapitalwert (geringer Investition aufgrund des fehlenden Wärmespeichers)
- Kein wirtschaftlicher Einsatz möglich
- Investition müsste um 34 % (diabat) bzw. um 54 % (adiabat) sinken

Unter welchen Bedingungen verbessert sich die Wirtschaftlichkeit?

Ergebnisse (III)

Parametervariation:



Referenzkonfiguration: Variation der Kompressorleistung oder der Turbinenleistung

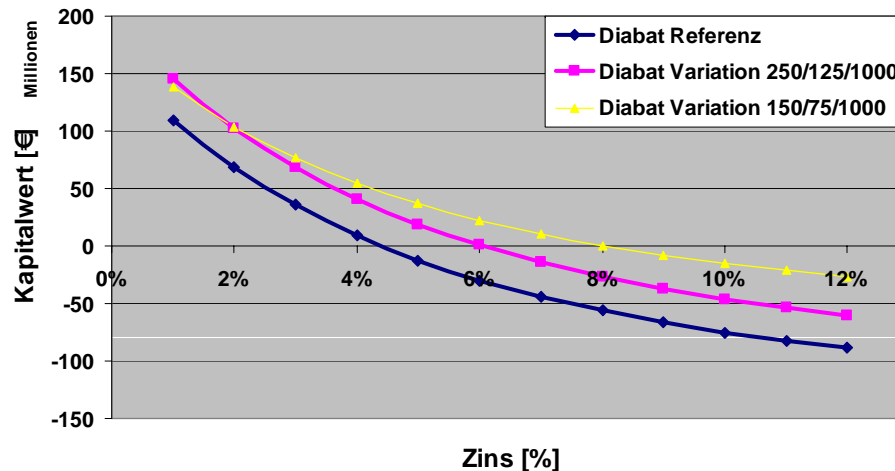
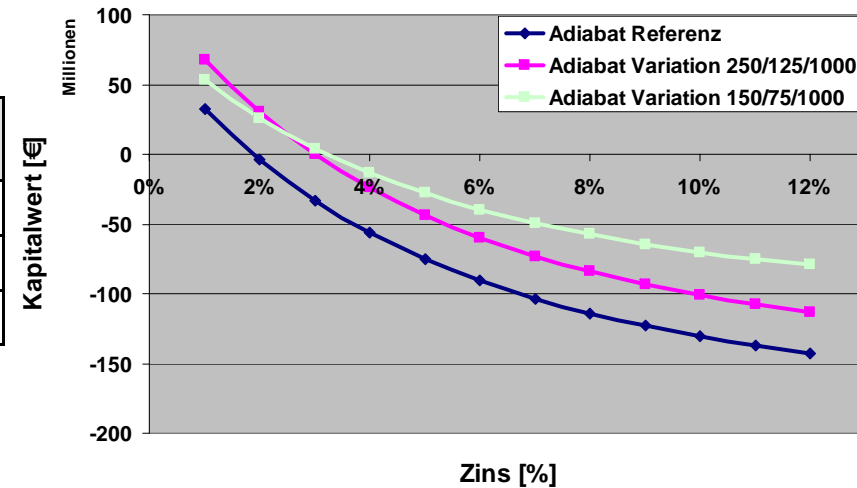
- Deckungsbeitrag verhält sich nicht proportional zur Kompressor- u. Turbinenleistung
- Geringe Veränderung des Deckungsbeitrags bei geringfügiger Verringerung der Leistung (keine Abstimmung auf den Reservemarkt)
- Durch Einsparungen in der Baugröße können die Investitionen und die Wartungskosten gesenkt werden

Kann dadurch die Wirtschaftlichkeit erreicht werden?

Ergebnisse (IV)

Kapitalwerte der neuen Anlagenkonfigurationen:

Konfiguration	Turbine [MW]	Kompressor [MW]	Speichergröße [MWh]
Referenz	300	150	1000
Variation 250/125/1000	250	125	1000
Variation 150/75/1000	150	75	1000



- Höhere Kapitalwerte
- Kleinste Konfiguration erzielt bestes Ergebnis, da geringste Investition und geringere fixe Kosten
- Adibat: hohe Investition für Wärmespeicher
- Keine Wirtschaftlichkeit erreicht

Gliederung

1. Einleitung
2. Ziel
3. Grundlagen
4. Methodik
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

- Marktgetriebener Einsatz von adiabaten und diabaten Druckluftspeichern
- Historische Analyse mit Deckungsbeitrag maximierendem Optimiermodell
 - Referenzkonfiguration nicht wirtschaftlich
 - Investition müsste um 34 % (diabat) oder um 54 % (adiabat) sinken
- Deckungsbeitrag verhält sich nicht proportional zur Anlagenleistung (Investition)
 - Verkleinerung der Anlagenleistung erhöht Kapitalwert
 - Maximal technisch realisierbare Anlagengröße nicht zwingend beste Lösung
 - Keine Wirtschaftlichkeit
- ***Druckluftspeicher müssen auf das Einsatzgebiet abgestimmt werden***

Ausblick:

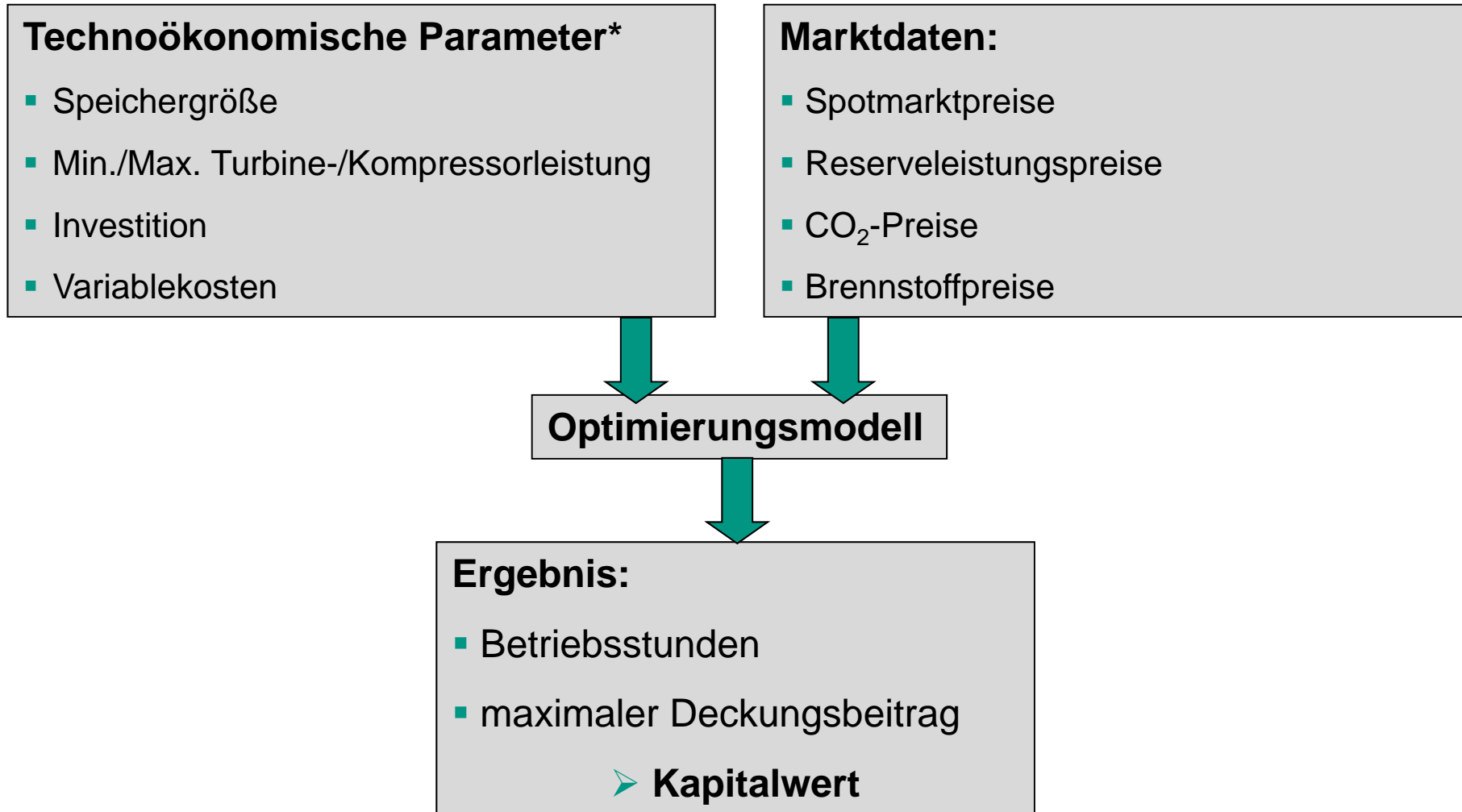
Optimierung der technischen Auslegung unter Verwendung spezifischer Investitionen

Danke für die Aufmerksamkeit

Rupert.Hartel@kit.edu

Methodik (V)

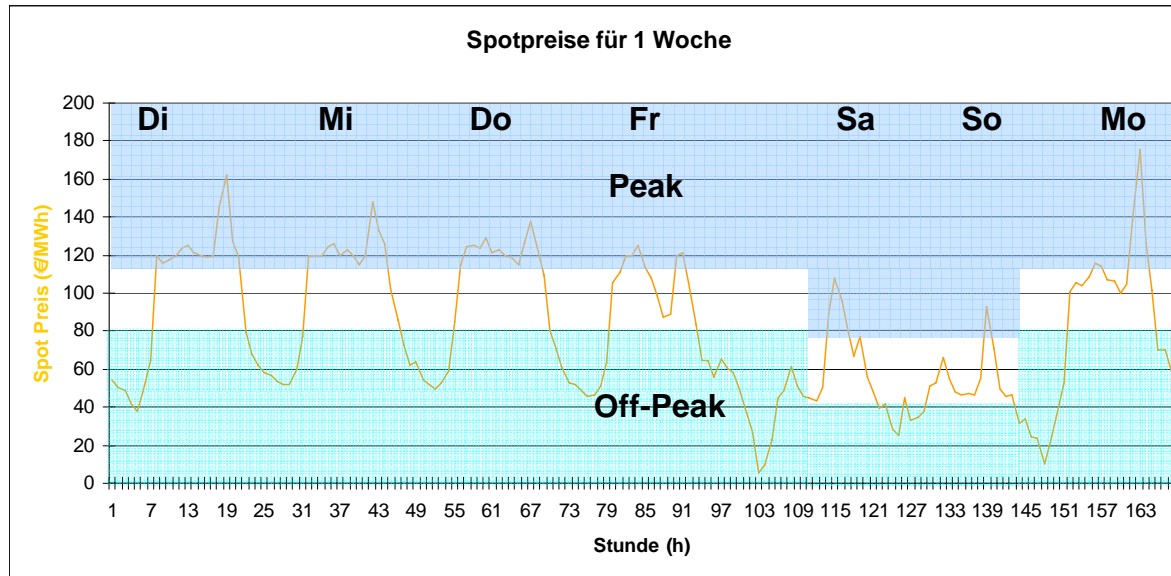
Das Optimierungsmodell:



* Gatzert 2008: „The Economics of Power Storage - Theory and Empirical Analysis for Central Europe”

Grundlagen: Einkommensquellen

Spotmarkt:



2008	Preis [€/MWh]
Max.	494
Min.	-101
Ø	66
Preis [€]	Stunden
<150	87
150-100	805
100-80	1.376
80-30	5.908
30-0	593
>0	15

Tertiärreservemarkt:

- Preise für angebotene Leistung (positiv und Negativ)
- Arbeitspreise für abgerufene Leistung

➤ ***Ist ein marktbasierter Einsatz der Druckluftspeicher wirtschaftlich?***