



Ann-Kathrin Klaas (Autor)

# **Speicherauslegung und Betriebsführung von Wasserstoff- Druckluftspeicherkraftwerken (HCAES) bei simultaner Teilnahme an verschiedenen Energiemärkten**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8915>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlagen der Modellierung . . . . .	8
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>Teil A: Konzeptionierung, Parametrierung und Vergleich von Speicherkraftwerken</b>	<b>13</b>
<b>2 Grundlagen der Speicherung von elektrischer Energie in Form von Druckluft und Wasserstoff</b>	<b>15</b>
2.1 Speicherkraftwerkskonzepte . . . . .	15
2.1.1 Druckluftspeicherkraftwerk . . . . .	15
2.1.2 Wasserstoff-Druckluftspeicherkraftwerk . . . . .	18
2.1.3 Wasserstoffspeicherkraftwerk . . . . .	19
2.2 Komponenten der Speicherkraftwerke . . . . .	20
2.2.1 Salzkavernen . . . . .	20
2.2.2 Wärmespeicher . . . . .	21
2.2.3 Elektrolyse . . . . .	22
2.2.4 Wasserstoff-Rückverstromung . . . . .	23

<b>3 Vergleich der Konzepte</b>	<b>25</b>
3.1 Quantitative Kriterien . . . . .	27
3.1.1 Speicherkapazität und Wirkungsgrad . . . . .	27
3.1.2 Investitionskosten . . . . .	32
3.1.3 Technology Readiness Level . . . . .	39
3.2 Qualitative Kriterien . . . . .	41
3.3 Zwischenfazit . . . . .	45
<b>Teil B: Dimensionierung von HCAES-Speicherkraftwerken</b>	<b>49</b>
<b>4 Modellbildung</b>	<b>51</b>
4.1 Ziel der Modellierung . . . . .	51
4.2 Kraftwerksbetrieb . . . . .	58
4.3 Energiemärkte . . . . .	64
4.3.1 Day-Ahead-Markt . . . . .	65
4.3.2 Regelenergiemärkte . . . . .	66
4.3.3 Stromlieferverträge mit EE-Anlagen . . . . .	72
4.3.4 Wasserstoffverkauf und Sauerstoffverkauf . . . . .	73
4.4 Zielfunktion . . . . .	75
<b>5 Ergebnisse der Dimensionierung</b>	<b>81</b>
5.1 Bestimmung eines Basisjahrs . . . . .	81
5.2 Sensitivitätsanalyse . . . . .	89
5.2.1 Investitionskosten . . . . .	90
5.2.2 Day-Ahead-Marktpreise . . . . .	92
5.2.3 Wind- und Solarpreise . . . . .	96
5.2.4 Wasserstoffpreis . . . . .	100
5.3 Zweidimensionale Sensitivitätsanalyse . . . . .	104
5.4 Auswertung . . . . .	108
5.5 Szenarienbasierte Dimensionierung . . . . .	110
5.6 Zwischenfazit . . . . .	121

<b>Teil C: Betriebsführung von HCAES-Speicherkraftwerken</b>	<b>125</b>
<b>6 Detailgrad des Speicherkraftwerksmodells</b>	<b>127</b>
6.1 Speicherkraftwerksbetrieb mit dem Basismodell . . . . .	127
6.2 Betriebsrestriktionen im Speicherkraftwerksmodell . . . . .	132
6.2.1 Minimale Teillast . . . . .	132
6.2.2 Teillastwirkungsgrad . . . . .	134
6.2.3 Elektrolysemodule . . . . .	137
6.2.4 Kopplung der elektrischen Maschine . . . . .	140
6.2.5 Umschaltung zwischen Kompressor- und Turbinenbetrieb . .	141
6.2.6 Startkosten . . . . .	142
6.2.7 Kombination der Betriebsrestriktionen . . . . .	148
6.3 Zwischenfazit . . . . .	151
<b>7 Rollierende Kraftwerkseinsatzplanung unter Berücksichtigung von Prognosefehler</b>	<b>153</b>
7.1 Rollierende Planung . . . . .	154
7.2 Prognoseverfahren . . . . .	159
7.3 Einfluss der Prognosegüte . . . . .	163
7.4 Zwischenfazit . . . . .	167
<b>8 Schlussfolgerungen</b>	<b>169</b>
<b>Literatur</b>	<b>177</b>
<b>Anhang zu Teil A</b>	<b>191</b>
A.1 Thermodynamische Analyse von Speicherkraftwerken . . . . .	191
A.1.1 Blockschaltbilder und Parameter . . . . .	192
A.1.2 Berechnungsvorschriften . . . . .	197
A.2 Definition des Technology Readiness Level . . . . .	205
A.3 Paarweiser Vergleich der Speicherkraftwerkskonzepte anhand quali- tativer Kriterien . . . . .	205

<b>Anhang zu Teil B</b>	<b>209</b>
B.1 Berechnung der normierten Wind- und PV-Einspeisezeitreihen . . . . .	209
B.2 Sensitivitätsanalyse der Eingangsparameter . . . . .	211
B.2.1 Day-Ahead-Marktpreise . . . . .	211
B.2.2 Regelenergiepreise . . . . .	213
B.2.3 Wind- und Solarpreise . . . . .	218
<b>Anhang zu Teil C</b>	<b>219</b>
C.1 Basismodell . . . . .	219
C.2 Preisprognose mit der sARIMA-Methode . . . . .	221