



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Energiebedarf in Deutschland . . . . .	2
1.2	Treibhausgasemissionen . . . . .	5
1.3	Detaillierte Betrachtung der Erneuerbaren Energien . . . . .	6
1.4	Gesetzliche und ethische Aspekte einer nachhaltigen Energieversorgung . . . . .	9
1.5	Analyse und Einordnung der Energiesituation in Deutschland . . . . .	10
1.6	Zielsetzung der Arbeit . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Technologien einer intelligenten Energieversorgung</b>	<b>13</b>
2.1	Smart Grid Technologien . . . . .	13
2.1.1	Elektrofahrzeug als Energiespeicher . . . . .	14
2.1.2	Power-to-Industrie . . . . .	15
2.1.3	Smart Citys und DC-Systeme . . . . .	16
2.2	Energiespeichersysteme . . . . .	19
2.2.1	Thermische Speicher . . . . .	20
2.2.2	Mechanische Energiespeicher . . . . .	21
2.2.3	Elektrische Energiespeicher . . . . .	24
2.2.4	Chemische Energiespeicher . . . . .	26
2.2.5	Stoffliche Energiespeicher . . . . .	31
2.3	Einordnung der Energiespeichersysteme . . . . .	35
2.3.1	Technologische Einordnung der Speichertechnologien . . . . .	35
2.3.2	Ökonomische Einordnung der Speichertechnologien . . . . .	37
2.3.3	Kostenstruktur von Energiespeichern . . . . .	38
2.4	Zusammenfassung Energiespeichersysteme . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Modellbildung zur Energiespeicherbetrachtung</b>	<b>43</b>
3.1	Modellierung auf Zellebene . . . . .	44
3.2	Empirische Modellierung einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie . . . . .	47
3.3	Vereinfachte Speichermodellierung . . . . .	53



<b>4</b>	<b>Analyse des Systemverhaltens mit Speichereinsatz</b>	<b>59</b>
4.1	Simulationsannahmen . . . . .	60
4.1.1	Simulationsannahmen Energienetz . . . . .	60
4.1.2	Simulationsannahme Erneuerbare Energien . . . . .	61
4.1.3	Simulationsannahme Energiespeichersysteme . . . . .	69
4.1.3.1	Simulationsannahme Batteriespeichersysteme . . . . .	72
4.1.3.2	Simulationsannahme Hybridspeichersysteme . . . . .	72
4.1.3.3	Systemwirkungsgrad eines Hybridspeichersystems . . . . .	74
4.2	Szenarien . . . . .	76
4.2.1	Energienetz und Erneuerbare Energien . . . . .	77
4.2.2	Betriebsstrategien der Energiespeichersysteme . . . . .	77
4.2.2.1	Lieferung von Dauerleistung aus Erneuerbaren Energien . . . . .	77
4.2.2.2	Begrenzung der Netzauslastung . . . . .	78
4.2.2.3	Vermeidung von Leistungsbezug durch Batteriespeicher . . . . .	79
4.2.2.4	Vermeidung von Leistungsbezug durch Hybridspeichersystem . . . . .	80
4.2.2.5	Speicherleistung in Abhängigkeit des Energieinhalts bei Vermeidung von Leistungsbezug . . . . .	82
4.3	Ergebnisse und Bewertung . . . . .	91
4.3.1	Bewertungskriterien . . . . .	91
4.3.2	Lieferung von Dauerleistung aus Erneuerbaren Energien . . . . .	96
4.3.3	Begrenzung der Netzauslastung . . . . .	100
4.3.4	Vermeidung von Leistungsbezug durch Batteriespeicher . . . . .	103
4.3.5	Vermeidung von Leistungsbezug durch Hybridspeichersystem . . . . .	108
4.3.6	Speicherleistung in Abhängigkeit des Energieinhalts bei Vermeidung von Leistungsbezug . . . . .	111
4.4	Wesentliche Zusammenfassung Kapitel 4 . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Speicherdimensionierung über ein Künstlich Neuronales Netzwerk</b>	<b>115</b>
5.1	Mathematischer Zusammenhang . . . . .	115
5.2	Aufbau des Künstlichen Neuronalen Netzwerks . . . . .	117
5.3	Ergebnisse der Analyse mittels des Künstlichen Neuronalen Netzwerks . . . . .	120



<b>6</b>	<b>Betriebskonzepte und Einsatzszenarien für Energiespeicher</b>	<b>123</b>
6.1	Technische und Ökonomische Speicherklassifizierung . . . . .	124
6.1.1	Angepasstes Ragone-Diagramm . . . . .	124
6.1.2	Bewertungsmatrix . . . . .	126
6.2	Betriebskonzepte für Batteriespeicher . . . . .	127
6.2.1	Wirkleistungsbereitstellung . . . . .	127
6.2.2	Blindleistungsbereitstellung zur Netzstützung . . . . .	128
6.2.3	Speicherbedarf für Haushalte in Deutschland . . . . .	128
6.2.4	Hybridspeichersystem mit einem Schwungmassenspeicher . . . . .	129
6.2.5	Hybridkraftwerk . . . . .	130
6.3	Betriebskonzepte einer Stofflichen Energiespeicherung . . . . .	131
6.3.1	Methan im Strom- und Wärmesektor . . . . .	131
6.3.2	Methan in der Mobilität . . . . .	132
6.3.3	Methanol in der Mobilität . . . . .	136
6.4	Fazit und Empfehlungen . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
	<b>Anhang</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Netzstruktur</b>	<b>143</b>
<b>B</b>	<b>Lastverläufe</b>	<b>169</b>
<b>C</b>	<b>Erzeugung Photovoltaik</b>	<b>173</b>
	<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>177</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>181</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>185</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>189</b>