

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 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 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 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 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 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 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 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>Anhang</b>	<b>141</b>
<b>A Netzstruktur</b>	<b>143</b>
<b>B Lastverläufe</b>	<b>169</b>
<b>C 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>