

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Verwendung von Energiespeichern .....</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Wofür Speicher genutzt werden .....	1
1.2.1	Energie und Leistung.....	2
1.2.2	Effizienz – Die Kosten der Umwandlung.....	4
1.2.3	Lade- und Entladeleistung .....	6
1.3	Energiespeichersysteme in der Anwendung .....	7
1.3.1	Mobile Geräte – Vom Smartphone bis zum Rasenmäher .....	7
1.3.2	Elektromobilität und mobile Maschinen .....	12
1.3.3	Mobile Arbeitsmaschinen .....	18
1.3.4	Stationäre Speicheranwendungen .....	23
1.4	Zusammenfassung .....	31
<b>2</b>	<b>Allgemeine Beschreibung von Energiespeichersystemen .....</b>	<b>33</b>
2.1	Einleitung .....	33
2.2	Mathematische Beschreibung des Aufbaus und der Funktion von Speichersystemen .....	36
2.2.1	Der Wirkungsgrad eines Leistungstransfers.....	37
2.2.2	Selbstentladung von Speichersystemen .....	42
2.3	Beschreibung eines Speichersystems durch das Leistungsflussdiagramm.....	44
2.3.1	Bestimmung der technischen Rahmenbedingungen .....	48
2.3.2	Bestimmung der Verlustleistungen .....	49
2.3.3	Definition der Zielfunktion .....	56
2.3.4	Bestimmung der optimalen Betriebsführung .....	59
2.3.5	Vergleich der technischen Lösungsvarianten.....	64
2.4	Bewertung von Systemkonzepten unter finanziellen Gesichtspunkten .....	72
2.4.1	Materialkosten, Produktions- und Produktkosten – Wie die Kosten eines Energiespeichersystems ermittelt werden.....	73
2.4.2	Einführung in die Investitionskostenrechnung .....	78
2.5	Zusammenfassung .....	86

<b>3</b>	<b>Einführung in die Anforderungsanalyse und den Systementwurf</b>	<b>89</b>
3.1	Einführung .....	89
3.2	Anforderungen und Komponenten .....	90
3.3	Basisanforderungen an Energiespeichersysteme .....	105
3.4	Basiskomponenten eines Energiespeichersystems .....	108
3.5	Zusammenfassung .....	110
<b>4</b>	<b>Einführung in die Leistungselektronik</b> .....	<b>113</b>
4.1	Einführung .....	113
4.2	Elektronische Komponenten für leistungselektronische Wandler .....	115
4.2.1	Realisierung eines Tiefsetzstellers mithilfe von ohmschen Widerständen – Der Spannungsteiler .....	115
4.2.2	Realisierung eines Tiefsetzstellers mit einem Kondensator und elektrischen Schaltern – Die Ladungspumpe .....	118
4.2.3	Der synchrone Tiefsetzsteller – Eine Realisierung mit Spule und Schalter .....	127
4.2.4	Wie man Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt – Die Diode als Gleichrichter .....	138
4.2.5	Wie man Wechselstrom umwandelt .....	143
4.2.6	Wenn die Frequenz gleich bleibt – Der Transformator als Wechselstromwandler .....	144
4.2.7	Wenn alles eingestellt werden muss – Der Frequenzumrichter .....	146
4.2.8	Elektrische Antriebstechnik – Wie aus Bewegung elektrische Leistung wird und umgekehrt .....	155
4.3	Beschreibung der leistungselektronischen Komponenten aus Sicht des Systemingenieurs .....	167
4.4	Anforderungen an Speichersysteme, die elektrische Komponenten verwenden	172
4.5	Zusammenfassung .....	175
<b>5</b>	<b>Mechanische Speicher</b> .....	<b>177</b>
5.1	Anforderungen an mechanische Speichersysteme .....	178
5.2	Energiespeicherung durch potenzielle Energie – Pumpspeicherkraftwerke und andere Konzepte .....	179
5.3	Energiespeicherung durch Nutzung der Rotationsenergie – Der Schwungradspeicher .....	187
5.4	Energiespeicherung mit potenzieller Energie Teil 2 – Rückstellkraft einer Feder	198
5.5	Anwendungsbeispiel – Aufrüstung eines Pumpspeicherkraftwerks für den Leistungsmarkt .....	207
5.6	Zusammenfassung .....	213

<b>6</b>	<b>Elektrische Speicher</b> .....	<b>215</b>
6.1	Einführung .....	215
6.2	Das Speichern von elektrischem Strom .....	216
6.2.1	Grundlegender Mechanismus der Stromspeicherung .....	216
6.2.2	Anforderungen an einen Stromspeicher .....	219
6.2.3	Supraleitung in Kürze .....	219
6.2.4	Beispiel für die Realisierung eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) .....	223
6.2.5	Zusammenfassung .....	225
6.3	Spannungsspeichersysteme .....	227
6.3.1	Aggregation von Kondensatoren – Wie eine Kondensatorbatterie aufgebaut sind .....	227
6.3.2	Doppelschicht- und Pseudokapazität – Wie Supercaps super werden ..	232
6.3.3	Anforderungen für Kondensatorbatterien mit Supercaps .....	237
6.4	Anwendungsbeispiel – Rekuperation eines Personenaufzugs .....	244
6.4.1	Anforderungsanalyse .....	246
6.4.2	Erstellen eines ersten Systementwurfs .....	248
6.4.3	Das Leistungsflussdiagramm des rekuperierenden Personenaufzugs ..	251
6.4.4	Energiemanagement des rekuperierenden Aufzugs mit Spannungssteuerung .....	253
6.4.5	Auslegung der Superkondensatorbatterie .....	254
6.4.6	Systemkomponenten und Requirement Traceability Matrix .....	259
6.5	Zusammenfassung .....	263
<b>7</b>	<b>Elektrochemische Speichersysteme</b> .....	<b>265</b>
7.1	Einführung .....	265
7.2	Allgemeine Überlegungen zu elektrochemischen Speichertechnologien .....	265
7.2.1	Die grundlegende elektrochemische Reaktion .....	266
7.2.2	Anforderungen und Systemkomponenten .....	273
7.2.3	Die Leiden des Alterns – Batterielebensdauer und Kapazitätsmanagement .....	280
7.2.4	Balancing-Systeme .....	285
7.2.5	Soft turn-off und Alterungsreserven – Kapazitätsmanagement von Batteriesystemen .....	289
7.2.6	Systemkomponenten elektrochemischer Speichersysteme .....	291
7.2.7	Zusammenfassung .....	295
7.3	Bleisäurebatterie .....	295
7.3.1	Primäre und sekundäre Reaktionen .....	296
7.3.2	Verhalten und Anforderungen – Vom Umgang mit Bleibatterien .....	300
7.3.3	Anwendungsbeispiel – Versorgung eines mobilen Funkübertragungsmastes .....	307
7.3.4	Zusammenfassung .....	324

7.4	Lithium-Ionen-Batterien .....	324
7.4.1	Die Zellchemie von Lithium-Ionen-Batterien .....	325
7.4.2	Verhalten und Anforderungen – Vom Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien .....	327
7.4.3	Anwendungsbeispiel – Solarstromspeichersystem für Wohngebäude ..	335
7.4.4	Zusammenfassung .....	357
7.5	Hochtemperaturbatterien .....	358
7.5.1	Primärreaktion .....	358
7.5.2	Anforderungen und Komponenten .....	360
7.5.3	Anwendungsbeispiel – Integration einer Natrium-Schwefel-Batterie in einen Windpark .....	366
7.5.4	Zusammenfassung .....	384
7.6	Redox-Flow-Batterien .....	385
7.6.1	Hauptreaktionen .....	385
7.6.2	Anforderungen und Verhalten von Redox-Flow-Batterien .....	387
7.6.3	Anwendungsbeispiel – Integration einer Redox-Flow-Batterie in einen Windpark in einem Inselnetz .....	394
7.6.4	Zusammenfassung .....	395
7.7	Zusammenfassung .....	396
<b>8</b>	<b>Chemische Speichersysteme .....</b>	<b>397</b>
8.1	Einleitung .....	397
8.2	Allgemeine Funktion und Anforderungen .....	399
8.3	Wasserstoff als Speichertechnologie .....	402
8.3.1	Die Gewinnung von Wasserstoff .....	409
8.3.2	Die Brennstoffzelle – Wie wir aus gespeichertem Wasserstoff Strom gewinnen .....	414
8.3.3	Anwendungsbeispiel – Auslegung eines mit Brennstoffzellen und Batterie betriebenen Nutzfahrzeugs .....	419
8.3.4	Zusammenfassung .....	437
8.4	Methanisierung – „Power to Gas“ oder „Power to Liquid“ .....	438
8.4.1	Die Grundreaktion für Leistung zu Gas .....	438
8.4.2	Anwendungsbeispiel – Integration von „Power to Gas“ in das Inselnetz	440
8.5	Zusammenfassung .....	444
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>445</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>449</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>461</b>