

Inhalt

1	Verwendung von Energiespeichern	1
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
2	Allgemeine Beschreibung von Energiespeichersystemen	33
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

3	Einführung in die Anforderungsanalyse und den Systementwurf	89
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
4	Einführung in die Leistungselektronik	113
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
5	Mechanische Speicher	177
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

6	Elektrische Speicher	215
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
7	Elektrochemische Speichersysteme	265
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
8	Chemische Speichersysteme	397
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
	Tabellenverzeichnis	445
	Literatur	449
	Stichwortverzeichnis	461